

Moderne Satellitenkommunikation

„Breitbandige Kommunikationsdienste zu erschwinglichen Preisen, wie macht man das?“

Die zeitgemässe Satellitenkommunikation zeichnet sich aus durch

- (1) leistungsfähigere und qualitativere Satelliten – EIRP, $G-T$, W_s
- (2) intelligenter Satelliten – die Signalverarbeitung und Vermittlung an Bord
- (3) kleinere „Erdfunkstellen“ – statt der 30 m Antenne bei Intelsat-1 bis -3
- (4) höhere Frequenzbereiche – die unteren sind voll besetzt und genutzt
- (5) höherwertige Modulationsverfahren – ASK statt PSK etc.
- (6) intelligenter Codierverfahren (und wirkungsvolle Chiffrieralgorithmen)
- (7) effektive Nutzung mit höchster Quellsignalkomprimierung
- (8) dynamische Zugriffsmethoden – DAMA statt P-2-P Verbindungen
- (9) adaptive Transponderbandbreiten und Satellitensendeleistungen
- (10) kanalangepasste Übertragung
- (11) responsive Netztopologie – Diversitätsempfang
- (12) zeitgemässes *Protocol Engineering*¹ – ISO/OSI und TCP-IP

Die Merkmale moderner Satellitenkommunikation werden im Folgenden beschrieben.

8.1 Leistungsfähigere und qualitativere Satelliten

8.1.1 Leistungsfähigere Satelliten

Eines der wesentlichsten Merkmale eines Fernmeldesatelliten ist seine Sendeleistung bzw. der Verbund der elektrischen Sendeleistung mit dem Antennengewinn der abstrahlenden Antenne, die *Effective to Isotropic Radiated Power* (EIRP).

¹ Protokoll = Vorschrift zur Durchführung einer Prozedur oder Abfolge eines Arbeitsprozesses

Die Satellitensendeleistung wurde von den 6 W mit einem Antennengewinn von ca. 4 dBi des INTELSAT-1 und einer Ansteuerung des Satelliten mit -74 dBW/m² bzw. (-111 dBW) auf 75 W Sendeleistung im C-Band und 130 W im Ku-Band drastisch angehoben. Diese bemerkenswerte Leistungssteigerung von fast vier Größenordnungen in den letzten vierzig Jahren auch des EIRP wurde durch verbesserte Satellitenantennentechnik und immer grössere Satellitenplattformen möglich. Diese machten höhere Sendeleistungen mit verbesserten Verstärkern möglich, die, im Falle von Wanderfeldröhrenverstärkern, mit Linearisierern arbeiten. Damit kann man mit Arbeitspunkten 3 bis 4 dB näher an der Sättigung, dem maximal möglichen Arbeitspunkt des Verstärkers fahren. Die nutzbare Ausgangsleistung des Verstärkers wird mehr als verdoppelt (s. Kap. 5.4.3, Linearisierung des Verstärkers).

Gleichzeitig hat man die Ansteuerung des Satelliten von einer Sättigungsleistung² $W_s = -74$ dBW/m² bzw. -111 dBW auf -85 dBW/m² (im C-Band) und -100 dBW/m² bzw. $-144,6$ dBW im Ku-Band empfindlicher gemacht. Entsprechend wurde die Güte $G-T$ der Satelliten verbessert. Damit können heute die Anforderungen an die *Uplink*-Leistung der Terminals merklich reduziert werden.

Das bei Intelsat 1980 eingeführte Ku-Band, mit 5 W bzw. 35 dBW EIRP pro 36 MHz-Transponder, führte inzwischen zu 55 dBW-Transpondern, eine Steigerung von 20 dB. Das militärische X-Band entwickelte sich ähnlich. Interessant ist, dass das englische Skynet-5 in mehreren Transpondern mit 160 W in 20 MHz (also 8 W/MHz) arbeitet, während andere in einem 120 MHz Transponder mit 80 W auskommen ($< 0,8$ W/MHz, was bei gleicher Übertragungsrate die Kosten am Boden mehr als verzehnfacht).

Damit wurden die „SuperGEOs“ möglich; das sind geostationäre Satelliten für die Kommunikation mit dem Handy. Die SuperGEOs gingen im gleichen Jahr in Dienst, in dem Schwärme von tief fliegenden Satelliten (LEOs) gestartet wurden und sogleich Bankrott anmeldeten (in 2000). SuperGEOs haben ungleich höhere Kapazität als LEOs, bei deutlich niedrigeren Kosten (ein globales SuperGEO System kostet weniger als 1 Mrd. Euro mit 15 Jahren Lebensdauer; Iridium kostete mehr als 10 Mrd. Dollar mit 7,5 Jahren Lebensdauer und 10% der Übertragungskapazität des SuperGEOs, ist also um den Faktor 200 teurer).

Die seit den siebziger Jahren angestrebte bordseitige Signalverarbeitung (*On Board Processing*; OBP) und Gesprächsvermittlung (*Satellite Switching*; SS) ist bei Thuraya, Inmarsat-4 und anderen Satelliten realisiert worden; sie erlaubt ungleich höhere Kapazitätsnutzung des Satelliten und damit niedrigere Kosten für den Teilnehmer.

Effiziente Antennen haben Einzug gehalten, in *Phased Array Technology*, auf dem Satelliten und am Boden, eine Flachantenne am Gebäude oder Vehikel, die auch mehrere Satelliten gleichzeitig empfangen kann und dieses auch im mobilen Einsatz, ohne mechanisch bewegliche Teile.

² die Leistung, mit der man den Satellitentransponder ansteuern muss, um ihn in die Sättigung zu fahren

8.1.2 Steigerungen der Satellitenkapazität

Mit Stand-der-Technik Solargeneratoren von höherem Wirkungsgrad und anderen Verbesserungen in der Satellitenplattform wächst die Gesamtmasse des Satelliten nicht linear mit der Anzahl von Transpondern, und damit wurde es zunehmend attraktiv, immer grössere Satelliten, bis hin zu 7 t Masse bei iPstar (2005), zukünftig ca. 10 t, die die ARIANE-V dann einschiessen können wird.

Diese Massnahmen führen zu immer niedrigeren Kosten pro Transponderjahr für die Nutzung – auf Grund der gesteigerten Satellitenleistung - mit immer kleineren und kostengünstigeren Bodenterminals (*Very Small Aperture Terminals*; VSAT, und *Satellite Interactive Terminals*; SITs).

8.1.3 Digitalisierung

Die Digitalisierung der zu übertragenden Signale ist heute allgegenwärtig; Sprache wird in der ortsfesten und insbesondere in der mobilen Kommunikation analog/digital gewandelt. Am Anfang der Digitalisierung wurde das Telefonsprachsignal in *Pulse Code Modulation* (PCM) mit 64 kb/s umgesetzt; mit Stand der Technik Algorithmen für Spracherkennung und -nachahmung kann menschliche Sprache in PCM-Qualität (*Toll Quality Voice*) mit 4,8 kb/s bis 1,2 kb/s dargestellt werden. Damit können 14 bis 54 Telefongespräche übertragen werden, in der Bandbreite, in der ISDN eines übertrug. Dies bringt deutliche Reduzierungen der Kosten pro Sprachkanal.

8.1.4 Broadcast Satellite Services

Broadcast Satellite Services (BSS), *Direct Broadcast Satellite* (DBS) oder *Direct-to-Home* (DtH) und *Direct Audio Broadcast* (DAB, in USA *Digital Audio Radio Service*, DARS) verlangen alle ein (*Receive Only*) Nutzerterminal zu sehr niedrigen Kosten. Mit der Verfügbarkeit von solchen Nutzer-Terminals für zum Teil unter 100 Euro hat das Satellitenfernsehen einen enormen Zuwachs, von weniger als 10 Millionen Terminals in Europa vor zehn Jahren, auf über 30 Millionen, erfahren.

Mit den jüngsten Starts von noch leistungsfähigeren Satelliten (Ku-Band EIRPs mit mehr als 60 dBW) darf von einem weiteren Wachstum in diesem Sektor ausgegangen werden. Mit diesen Sendeleistungen kann auch hochauflösendes Fernsehen (*High Definition TV*, HDTV) abgestrahlt werden.

Im Audio-Rundfunk ist in Europa die Fa. Worldspace seit langem auf Sendung, in den USA Sirius und XM-Radio seit 2001. Sie arbeiten mit billigen Empfängern im Bereich von \$100–\$200. Mehr und mehr Autohersteller installieren diese Geräte als Grundausrüstung.

8.1.5 Mobilfunk – Mobile Satellite Services

Parallel zur Proliferation von VSATs in den *Fixed Satellite Services* (FSS) expandierten die *Mobile Satellite Services* (MSS), die mit wenigen grossen Ankerstationen und Millionen von Kleinstterminals auf Schiffen, Flugzeugen und Fahrzeugen

zum Einsatz kamen. Zunächst waren Bitraten von 6,4 kb/s bis 19,2 kb/s möglich, mit denen Sprache, Daten und Fax übertragen wurden; mit Inmarsat-4 werden Dienste bis 492+kb/s angeboten und die Kulmination: MSS wie Thuraya (2000) und INMARSAT-4 (2005) ermöglichen die Sprachübertragung über geostationäre Satelliten bis ins Handy.

8.1.6 Qualitativere Satelliten

Die Qualität der Satelliten konnte seit Intelsat-1 (6 Monate Betriebsdauer) kontinuierlich gesteigert werden (Intelsat-8 wurde für 20 Jahre Betriebsdauer spezifiziert). Zu Beginn der Satelliten-Ära war es üblich, dem operationellen Satelliten einen Reservesatelliten zur Seite zu stellen (*In Orbit Spare*) und einen Dritten am Boden vorzuhalten, für den Fall, dass einer der beiden im Orbit ausfällt (*On Ground Spare*). Heute werden viele Systeme ohne auch nur einen einzigen Reservesatelliten erfolgreich, wenngleich ein bisschen riskant, geflogen.

Man sieht zum Teil die Anmietung von Kapazität auf anderen Systemen vor, für den Fall dass der eine Satellit ausfällt. Diese Lösung ist jedoch von begrenztem Vorteil; zum Einen kostet das reine Vorhalten von Reservekapazität laufend Geld (der Betreiber des anderen Systems kann diese Kapazität ja nicht anderweitig vermarkten), und zum Anderen müssen für den Übergang auf diese Ersatzkapazität auf einem anderen Satelliten sämtliche Bodenstationen auf diesen anderen Satelliten ausgerichtet werden, ein riesiger Montageaufwand.

Auch die extrem lange Betriebsdauer ist von begrenzter Nützlichkeit. Ein Satellit wird für eine gegebene Nutzungsanforderung ausgelegt und dimensioniert. Danach folgen typischerweise zwei Jahre für interne Genehmigung, Ausschreibung, Auswahl des Herstellers und Verhandlungen bis zur Auftragsvergabe. Dann folgen drei Jahre Bauzeit, Einschuss und In-Orbit-Abnahme, zusammen also fünf Jahre nach Abschluss der Auslegung, Dimensionierung und Spezifizierung.

Um nach zwanzig Betriebsjahren den aktuellen Anforderungen immer noch entsprechen zu können, müssten die Ingenieure 25 Jahre vor diesem Zeitpunkt diese „aktuellen Anforderungen“ erraten können. Dieses ist nicht möglich; oft genug werden Satelliten lange vor dem Ende ihrer Betriebsdauer aus dem Dienst genommen, weil sie die geänderten Verkehrsprofile oder neuen Dienste nicht mehr bedienen können. Ein weiterer Grund, der häufig zur Ausmusterung eines noch funktionstüchtigen Fernmeldesatelliten führt, ist die oben angeführte Verfügbarkeit von höheren Sendeleistungen der neueren Satelliten, die seine weitere Nutzung unwirtschaftlich machen würde.

8.2 Intelligenter Satelliten – Signalverarbeitung und Vermittlung an Bord

Der weiteren Steigerung der Satellitenkapazität durch immer grössere Satelliten höherer Leistung ist aber eine Grenze gesetzt dadurch, dass sich das für Satellitenkommunikation verfügbare Frequenzband endlich ist. Die für Satellitenfunk ausgewiesenen Frequenzbänder sind heute bis in den 20/30 GHz Bereich voll belegt; man

muss mit neuen Satellitensystemen in immer höhere Frequenzlagen ausweichen oder das Spektrum in den niedrigeren Frequenzbereichen effizienter nutzen.

Eine sehr wirksame Methode der effizienteren Spektrumsnutzung bietet die Zellulartopologie, wie sie auch im terrestrischen Mobilfunk angewandt wird. Anstatt grosse Gebiete mit einer einzigen Ausleuchtung abzudecken, bündelt die Satellitenantenne mehrere vergleichsweise kleine Zellen am Boden, in denen dann das Spektrum in der jeweils übernächsten Zelle wieder verwendet werden kann.

Mit dieser Zellulartopologie lässt sich das verfügbare Spektrum linear mit der Anzahl der Zellen real vergrössern.

8.2.1 Die Vermittlungsfunktion

Für die Vermittlung jeder Zelle mit allen anderen $(n - 1)$ Zellen werden $(n - 1)^2$ Verbindungen (Transponder) benötigt; einschliesslich Verkehr innerhalb der Zelle sind es n^2 Transponder, die im Satelliten installiert werden müssen. Statt einer Nutzlast von n^2 Transpondern (à z.B. 10 kg) kann man jedoch einen Rechner (Prozessor) einsetzen, der die Vermittlungsfunktion wahrnimmt. Dieser Rechner an Bord kann die Signale selbständig vermitteln (Thuraya) oder auch die Kommandos einer zentralen Netzvermittlung vom Boden ausführen (INMARSAT-4).

8.2.2 Die Optimierung der Übertragungskapazität

Neben der reinen Vermittlungsfunktion, die mit n^2 Transpondern in der Nutzlast theoretisch auch stattfinden könnte, kann der Rechner die Übertragungskapazität optimieren, indem er den Verkehr bedarfsgesteuert bedient. Ein Transponder zwischen zwei Zellen, die momentan keinen Verkehr haben, liegt brach, was insbesondere dann unschön nachteilig ist, wenn zwischen zwei anderen Zellen mehr Verkehr anfällt, als der dortige Transponder bedienen kann, so dass Kommunikationsbedarf unabgedeckt bleibt, der Kunde abgewiesen oder in eine Warteschlange gestellt werden muss. Der Rechner setzt die Übertragungskapazität bedarfsabhängig auf den Links ein, wo sie das aktuelle Verkehrsaufkommen verlangt.

8.2.3 Im Orbit rekonfigurierbare Übertragungskapazität

Im Gegensatz zu fest installierten Transpondern kann der bordseitige Hochleistungsrechner die Übertragungskapazität im Orbit (im Flug) rekonfigurieren wenn das Bedarfsprofil am Boden sich während der Betriebsdauer des Satelliten ändert. Entsteht zum Beispiel an einem Ort ein Industriepark, der einen entsprechenden Kommunikationsbedarf hat, kann die rechnergestützte Vermittlung im Satelliten so umprogrammiert werden, dass auch dieser Bedarf vermittelt und bedient wird.

8.2.4 In-Orbit Vernetzte Übertragungskapazität – Inter Satellite Links

Das endliche Frequenzspektrum und die kostenintensive Infrastruktur im Raum kann zu merklich effizienterer Nutzung geführt werden, wenn die Satelliten im Orbit vernetzt werden. Die wesentlichen Attribute der Paketvermittlung (alternatives

Routing, also *Transmission Security*, und insbesondere *Communications Security*) können erst durch die vernetzte Infrastruktur im Raum genutzt werden.

Spätestens in den höheren Frequenzlagen (ab Ka-Band) bietet die Vernetzung die Möglichkeiten des diversitären Empfangs zur ununterbrochenen Aufrechterhaltung des Kommunikationsdienstes auch bei intensiven Niederschlägen.

Die Vernetzung der Satelliten mit *Inter Satellite Links* ist Stand der Technik; die Anforderungen der *Inter Satellite Links* an das Raumsegment stehen im Verhältnis zu der durch sie gewonnen Nützlichkeitssteigerung des Raumsegmentes. Dadurch dass (auch optische) *Inter Satellite Links* heute in Masse und elektrischer Leistung nur noch mässige Anforderungen stellen, können Sie auch auf kleineren Satelliten eingesetzt werden.

8.2.5 Die regenerative Verarbeitung der Signale

Mit dem bordseitigen Prozessor können Hochfrequenzträger auch demoduliert und die Signale dann, im Basisband, fehlerkorrigiert werden, um die auf der Aufwärtsstrecke entstandenen Übertragungsfehler zu bereinigen. Dies ist insbesondere in der persönlichen Kommunikation (*Personal Communications System*; PCS) mit dem Handy von Bedeutung: Die Übertragung wird hier durch die korumpierte Strecke vom leistungsbegrenzten Handy zum Satelliten geprägt und begrenzt. Die Bereinigung der Aufwärtsstrecke im Satelliten mildert diese Systembegrenzung.

8.2.6 Die Umsetzung der Signalbündelung im Satelliten

Die einzelnen Signale verschiedener Nutzer werden für die Übertragung über einen Satelliten zweckmässig auf Hochfrequenzträger gebündelt. Die beiden wesentlichen Bündelungsarten sind *Time Division Multiplex* (TDM), Zeit-kohärente Rahmen im Basisband und *Frequency Division Multiplex* (FDM), Frequenz-kohärente Rahmen im Basisband. Die Bündelung findet am besten zu Beginn der Aufwärtsstrecke am Boden statt. Dies ist in der persönlichen Kommunikation mit vielen, geographisch dispergierten Einzelnutzern nicht möglich – wohl aber kann zu Beginn der Abwärtsstrecke im Satelliten gebündelt werden.

Vom Handy zum Satelliten arbeitet man mit Vielfachzugriffsverfahren. Die drei wesentlichsten Verfahren sind der Zeitvielfachzugriff (*Time Division Multiple Access*, TDMA; inkohärente *Bursts* auf einem Hochfrequenzträger), der Frequenzvielfachzugriff (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA; inkohärente Hochfrequenzträger im Spektrum gestaffelt) und der Codevielfachzugriff (*Code Division Multiple Access*, CDMA; inkohärente Einzelübertragungen, gleichzeitig und auf derselben Frequenz).

Für effiziente Übertragung und zur Reduzierung der Komplexität im Handy werden in *Personal Communications Systems* die Bündelungsarten der Signale in den Prozessoren im Satelliten umgesetzt, meist von TDMA (Aufwärtsstrecke vom Handy zum Satelliten) auf TDM (Abwärtsstrecke vom Satelliten zur Speisestation und insbesondere vom Satelliten zum Handy; das kontinuierlich kohärente TDM

Signal ist im Handy ungleich einfacher zu empfangen, als ein TDMA Signal, bei dem der Empfänger jeden einzelnen, typischerweise 1 ms langen *Burst* in wenigen μ s akquirieren muss, einen nach dem anderen). INMARSAT-4, Al Thuraya, ACeS, Iridium etc. arbeiten auf diese Weise.

8.3 Kleinere Erdfunkstellen

Die 30 m grossen Antennen der frühen Intelsat-Ära sind technisch passé, aber selbst die 15 bis 10 m Antennen der klassischen Satellitenkommunikation eignen sich nicht für die moderne Geschäftskommunikation oder gar für persönliche Dienste und INTERNET. Dazu braucht es kleine *Very Small Aperture Terminals*, VSATs, die im 11/14 GHz Band arbeiten, oder *Satellite Interactive Terminals*, SITs, im 20/30 GHz Bereich. SITs transportieren professionelle Kommunikation und multimediale Breitbandanwendungen, global ubiquitär, ins Büro, ins Amt und natürlich auch nach Hause. Diese Kleinsterdfunkstellen sind durch die höheren Satellitensendeleistungen möglich geworden.

Heute gängige VSATs sind kleiner als 2 m, haben niedrige Sendeleistungen von ein paar Watt und mässige Kosten. Sie sind meist interaktiv (senden und empfangen) und verwenden unterschiedliche Netzarchitekturen. Sie ergänzen herkömmliche, terrestrische Festnetze. Flexibles Aufstellen erlaubt rasch, ohne Infrastrukturmassnahmen, wirtschaftlichen Betrieb. Allerdings dürfen die Kosten des Aufstellens nicht unterschätzt werden. Meist muss der Aufstellungsort erst geschaffen werden: für einen auf Frosttiefe gesetzten Betonsockel, einen wettersicheren Kabelschacht zum Betriebsraum und einen TÜV-gerechten Blitzschutz für das Terminal können die Baukosten die Beschaffung des VSATs übersteigen.

Die beiden führenden Hersteller produzieren über 250 000 SITs pro Jahr. Damit werden Internet, DirecPC und Breitbanddienste für Schulen, Weiterbildung, „e-commerce“, „e-retailing“, *Chat Rooms*, Finanzdienste, Unterhaltung (*Music Downloads*) etc. zu Millionen von Teilnehmern weltweit gebracht.

Die Datenrate der interaktiven SIT wächst ständig und reicht heute weit über 10 Mbit/s. Die Zeitspanne von der Planung bis zur Inbetriebnahme von kompletten



Abb. 8.1 Ein Very Small Aperture Terminal (VSAT) bzw. Satellite Interactive Terminal (SIT)

Netzen kann, im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen, entscheidend reduziert und somit die Betriebswirtschaftlichkeit verbessert werden. Es gibt zunehmend Satelliten, die der niedrigen Sendeleistung, dem kleinen Antennengewinn und der geringen Empfangsgüte $G-T$ der VSATs und SITs Rechnung tragen. Damit

- hängt der Nutzer mit Netzkonfiguration, Dienstedefinition und Tarifen nicht von anderen Netzbetreibern ab (*Zero Stop Shopping – do it yourself*);
- kann der Betreiber von SAT-Netzen seine Übertragungsqualität (BER) und Dienstverfügbarkeit (in % der Zeit) selbst bestimmen und einstellen;
- kann der Betreiber sein Netz billiger und schneller rekonfigurieren, wenn sich ändernde Verkehrsprofile dies erfordern;
- wird die Satellitenlösung kostengünstiger in Anschaffung und Betrieb als die terrestrische Alternative.

8.3.1 Die Erdfunkstelle – das Terminal

Vor vierzig Jahren hatte eine Erdfunkstelle, eine Kommunikationsantenne mit Infrastruktur, für das Senden und Empfangen von Satellitensignalen, einen Durchmesser von 30 m und mehr und war voll nachführfähig um gegebenenfalls auch mit umlaufenden Satelliten arbeiten zu können. Sie speiste die Signale ins öffentliche Wählnetz ein, später auch ins Internet. Die Erdfunkstellen, die so teuer waren wie die Satelliten, waren charakterisiert durch:

- grosse, festinstallierte, langfristig betriebene Anlagen
- Besitz und Betrieb durch die Telekommunikations-Regierungsbehörden
- technische Komplexität und insbesondere proprietäre Technologien
- hohe Beschaffungs- und Betriebskosten
- begrenzte Interkonnektivität

Heute ist eine so genannte Erdfunkstelle eher eine

- *Very Small Aperture Terminal* (VSAT, ein Terminal kleiner Apertur mit $< 1,5$ m Durchmesser), das kommerziellen Teilnehmern wie auch lokalen und nationalen Regierungsstellen Kommunikationsdienste vermittelt, von niedrigen Bitraten (Telefonie, Daten) bis Breitband-Daten, Video und *Down-Loading*
- Teilnehmer *Direct-to-Home* (DTH) Fernsehdirektempfangsanlage mit einer kleinen Parabol-Antenne (< 1 m Durchmesser) und einem *Digital-Set-Top-Box* Empfänger (STB) für den Empfang von digitalen Programmen
- Batteriegetriebene mobile Transceiver für Satellitenkommunikation mit niedrigen Bitraten (Duplex Sprache und/oder Daten), das auch *Location Data*, der geografische Ort des Teilnehmers, per *Global Positioning Satellite* (GPS) ermittelt und an die Basisstation übermittelt.

In den nächsten Jahren wird der Fortschritt in der Herstellung von *Low-Cost Receive-Only* und *High-Speed Interactive Earth Stations* den Erfolg der Satellitenindustrie bestimmen, mehr so als die Entwicklung und die Kosten der Satelliten. Nach 40 Jahren Satellitentechnik sind die Erdfunkstellen gekennzeichnet durch:

- hohe Mobilität
- privatwirtschaftliche Besitzer und Netzwerkbetreiber
- höchste Integrationstechniken, fortgeschrittene Standardisierung und Interoperabilität
- vergleichbar niedrigere Kosten
- saumlose und flexible Vernetzung mit den terrestrischen Infrastrukturen.

Seit der erste kommerzielle Satellit von COMSAT für Intelsat 1965 gestartet wurde, haben die Hersteller die (EIRP) der C-Band Transponder von circa 10 dBW in 50 MHz (0,2 W/MHz) auf 55 dBW in 36 MHz (8 784 W/MHz) gesteigert.

Mit den leistungsgesteigerten Satelliten können heute die Anforderungen an die Antennen am Boden entsprechend reduziert werden. Die ursprüngliche Intelsat-Antenne mit 30 m Durchmesser (Standard A) mutierte bis in den Standard G mit 1 m Durchmesser (für ortsfeste Dienste) – ein Faktor 30, also 900 mal weniger Antennengewinn, die von der Satellitensendeleistung kompensiert wird. Allerdings werden weitere Steigerungen der Satellitenleistung nicht zu weiteren Reduzierungen des Antennendurchmessers führen können, da

- der auf die Erde gerichteten Sendeleistung Grenzen gesetzt sind, und
- die heute üblichen VSAT-Antennen eher grösser als kleiner werden müssen, um Störungen benachbarter Satelliten zu reduzieren.

Die Umlaufbahn wird immer dichter besetzt, die Abstände zum im gleichen Frequenzband arbeitenden Nachbarsatelliten immer kleiner, so dass sein Schutz vor der eigenen Ausstrahlung und der Schutz des eigenen Empfangs vor der Störung durch den Nachbarsatelliten immer grössere Direktivität der Erdfunkstelle auf den eigenen Satelliten erfordert, also immer grössere Antennen. Die ersten Satellitensysteme sind heute schon nicht mehr leistungs- oder bandbreitenbegrenzt, sondern störungsbegrenzt (*interference limited*).

Die Direktivität der Erdfunkstellenantenne kann nur mit ihrer Apertur, und damit ihrem Durchmesser, gesteigert werden. Die Separierung Ψ der Satelliten im Orbit als Funktion der Antennenhalbwertsbreite θ_o verhält sich wie

$$\tan \theta_o = (5,61/6,61) \tan \Psi/2$$

In Tabelle 8.1 sind C-Band und Ku-Band Standards für Erdfunkstellen im Intelsat-System und die jeweiligen Antennenhalbwertsbreiten θ_o aufgezeigt.

Tabelle 8.1 Die Standards der INTELSAT Erdfunkstellen

Standard	A _{old}	A _{new}	B & C	G
Durchmesser	≥ 30 m	15–17 m	11–13 m	0,8–1,2 m
Halbwertsbreite θ_o	0,11° (6 GHz)	0,21° (6 GHz)	0,11° (14 GHz)	1,50° (14 GHz)
Projiziert in den Orbit	0,09°	0,18°	0,10°	1,30°
10 dB-Distanz im Orbit	0,28°	0,55°	0,31°	4,00°
20 dB Distanz im Orbit	0,90°	1,70°	1,00°	12,0°

Während die Antennen nach Standard-A, -B und -C gute Direktivität aufweisen, die sowohl hinreichenden Schutz der benachbarten Satelliten, als auch vor den benachbarten Satelliten garantiert, hat die Antenne Standard-G einen Abfall von 3 dB relativ zur Strahlachse (die Halbwertsbreite projiziert in den Orbit) erst nach $\pm 0,65^\circ$, einen Abfall von 10 dB relativ zur Strahlachse (die „10 dB-Distanz“) erst nach $\pm 2,0^\circ$ und einen Abfall von 20 dB nach $\pm 6,0^\circ$. Wollte man die Störung der Nachbarsatelliten auf einen Wert 20 dB unter der eigenen Trägerleistung begrenzen, müssten sie mindestens $\pm 6,0^\circ$ Abstand im Orbit einhalten.

► **Der exzessive Orbitbedarf spricht klar gegen Terminalantennen < 1,5 m.**

Hält man die Sendeleistung des Terminals um eine Größenordnung (10 dB) unter der mittleren Sendeleistung der anderen Stationen, kommt man zwar mit der 10 dB Distanz zu einer akzeptablen Orbitbesetzung ($\pm 2,0^\circ$ zum Nachbarn); die kleine Antenne empfängt aber bei 11 GHz mit etwa -4 dB relativ zur Strahlachse, kann also die Empfangsstörung der benachbarten Satelliten nicht hinreichend diskriminieren. Wenn diese im Mittel 10 dB über der eigenen Empfangsleistung liegen, sind sie trotz des -4 dB-Empfangs immer noch 6 dB stärker als das eigene Signal.

Die ursprüngliche Inmarsat-1-Antenne auf dem Schiff mit 1,2 m Durchmesser (23 dBi Gewinn im L-Band) für die Übertragung von einem analogen Sprachkanal, arbeitete mit einem Satelliten mässiger Sendeleistung, der damals Stand der Technik war. Die heutigen Satelliten der Inmarsat-4 Klasse, die Thuraja (für die Gebiete Naher Osten, Europa, Asien), ACeS (Indonesien, China), MTSATs (Japan, Korea) mit ihren 12 m bis 18 m grossen Satellitenantennen erlauben Datenraten bis zu 492 kb/s mit „Erdfunkstellen“ ohne Gewinn (0 dBi, omnidirektionale Null-Gewinn-Stummelantennen am Handy).

Die Mobiltelefone sind meist hybrid; sie arbeiten sowohl mit dem Satelliten als auch mit den terrestrischen GSM bzw. UMTS Netzen. Neben der interaktiven Kommunikation mit niedrigen Bitraten können sie auch Daten-Rundfunk (*Broadcast*) mit hohen Bitraten empfangen (*Receive Only*), wie z.B. allgemeines *Down-Loading*, *Video Streaming* etc.

8.3.2 Die Kosten der Erdfunkstelle

Die Kosten der Terminals hängen wesentlich ab von der Art der zu bedienenden Dienste; Satelliten-Dienste beinhalten

- Ortsfeste Dienste (*Fixed Satellite Service*; FSS)
- Mobilfunk (*Mobile Satellite Service*; MSS)
- Rundfunk (*Broadcast Satellite Service*; BSS; including DTH Services)
- Ortungsdiensten (*Radio Determination Satellite Service*; RDSS, bei der der Teilnehmer geortet wird)
- Ortungsdienste (*Global Navigation Satellite Service*; GNSS, bei der der Teilnehmer seinen Ort bestimmt).

Weiterhin hängen die Kosten von den folgenden Faktoren ab:

- Der Netzwerktopologie, z.B. das Stern-Netz, das voll vermaschte Netz, oder das Hybridnetz; die Funktionalität, z.B. *Receive-Only* oder interaktivem Betrieb, und der Satellitenkapazität, z.B. fester Bandbreitenreservierung oder bedarfsabhängiger Zuteilung etc.
- Der Leistungsanforderung, also Verfügbarkeit des Dienstes, Qualität der Übermittlung, die Datenrate etc.
- Den Parametern des Terminals, z.B. Grösse (und dem Gewinn) der Antenne, ihrem Gewicht, den Anforderungen der Aufstellung (auf Frosttiefe gesetztes Fundament, Leistungszuführung, Blitzschutz, geplante Lebensdauer etc.)

Natürlich will der Nutzer immer billigere Terminals, insbesondere im Direktempfang von Fernsehen (*Direct-to-Home*; DTH), Empfang von Audio (*Digital Audio Broadcast*; DAB bzw. DARS in USA), Mobilfunk (MSS) und auch den konventionellen ortsfesten Diensten (FSS). Dies ist die Herausforderung an die Hersteller, die mit ausgewogenem Design und insbesondere mit der Massenproduktion arbeiten; diese ist bei Fernsehempfang am ehesten gegeben, beim Mobilfunk an zweiter Stelle und bei FSS am wenigsten.

Tabelle 8.2 Kosten von Bodenstationen

Erdfunkstellenstandard	Typische Kosten
Intelsat Standard A _{old}	≥ 20 000 000 €
Intelsat Standard A _{new}	≥ 10 000 000 €
Broadband interactive VSAT (Mesh Topology)	2000–4000 €
Broadband interactive VSAT (Star Topology)	1000–2000 €
Handy (Mobile)	500–1000 €
Receive-Only DTH Terminal	50–200 € ³

8.3.3 Der Aufbau der Erdfunkstelle

Eine Erdfunkstelle besteht aus der *Out-Door-Unit* (ODU) auf einem Fundament einschliesslich Leistungsversorgung und Blitzschutz, der *In-Door-Unit* (IDU) und dem Anschluss zum Gebäude. Die im Freien stehende ODU besteht aus der Send- und Empfangsantenne und dem unmittelbar an der Antenne angebrachten Hochfrequenzteil, dem *Radio Frequency* (RF) *Transceiver*.

Sendeseitige Effizienz ist dann gegeben, wenn der Sendeverstärker so nahe wie möglich an der Antenne ist, im Limit im Focus. Die empfangsseitige Güte der Antenne ist dann gegeben, wenn der rauscharme Vorverstärker so nahe wie möglich an der Antenne ist, typischerweise im Focus. Die teilweise Abschattung der Antennenapertur durch die Verstärker wird bei Offset-Antennen vermieden, bei denen diese ausserhalb des Gesichtsfeldes der Antennenapertur platziert sind.

³ ohne Installation

Die Verbindung ODU/IDU zum Gebäude besteht aus IF-Kabel (*Intermediate Frequency*), die in der Zwischenfrequenz, und der Stromversorgung.

Die Basis-Band Subsysteme und alle Folgegeräte sind im Gebäude oder zumindest einem geeigneten Container beherbergt, in der IDU.

8.3.4 Parabolantennen

Die Antenne ist das augenfälligste Subsystem einer Erdfunkstelle; sie ist meist ein Parabolreflektor mit einer Richtwirkung, in die elektrische Sendeleistung konzentriert ist; je kleiner die Antenne ist, desto grösser der Rundumstrahlungseffekt.

Das gebräuchlichste Terminal besteht aus den folgenden Komponenten:

- dem Parabolreflektor,
- dem Speisesystem, zentral gespeist (*center-fed*) in der Strahlachse der Antenne, oder seitlich eingespeist (*off-set fed*), neben der Strahlachse, die Apertur der Antenne nicht blockierend,
- dem *Ortho Mode Transducer* (OMT), der die beiden orthogonal polarisierten Empfangssignale separiert und meist *Transmit Reject Filter* integriert.

Der Gewinnfaktor der Antenne ist proportional zum Quadrat des Durchmessers und zum Quadrat der Arbeitsfrequenz.

Es gibt weitere Parabolantennen wie die Torusantenne und ellipsoide Formen, für den gleichzeitigen Empfang mehrerer dislozierter Satelliten. Diese *Multibeam*-Antennen empfangen z.B. ein Unterhaltungsprogramm von einer Orbitalposition, und gleichzeitig ein zweites Signal, z.B. einen breitbandigen Internetzugriff, von einem Satelliten auf einer anderen Orbitalposition.

Andere Arten von Antennen sind

- Helixantennen; (*Cork Screw Antennas*)
- Monopol und Dipol Antennen (wie wir sie im Handy haben)
- planare Reflektoren mit fest installierter „Blickrichtung“ (*Flat Patch Antennas*)
- elektronisch gesteuerte *Phased Array* Antennen (*Agile Phased Arrays*), für den Einsatz im Mobilfunk.

8.3.5 Phased Array Antenna

Die so genannten *Phased Array Antennas* (Gruppenstrahler) sind Anordnungen von Einzelstrahlern (Monopolen oder Dipolen), die so in Amplitude und Phase angesteuert werden, dass sie eine Direktivität in Zielrichtung bilden, wie Parabolantennen gleicher Apertur. Im Gegensatz zu ihnen zeichnen sie sich aus durch

- potentiell niedrigere Kosten, da insgesamt in Halbleitertechnik realisierbar; die Kosten von Halbleitern fallen mit den Stückzahlen
- *Low Profile* – (*Inconspiguuity*) – sie sind zweidimensional, ohne das herausragende Speisesystem in der dritten Dimension
- *Phased Arrays* können in anderen Materialien eingebracht werden (*Embedded Antennas*) und in fast jeder Struktur mit flacher oder gekrümmter Oberfläche (*Conformal Arrays*) realisiert werden

- sie können in multiplen Fraktalflächen aufgeteilt werden, die z.B. auf einem Vehikel verteilt angebracht werden können
- die Nachführung des/der Satelliten ist unendlich schnell, weil elektronisch und ohne mechanisch bewegliche Teile (*Agile Phased Array Antennas*)
- es können mehrere „Beams“ gleichzeitig und unabhängig gebildet werden, um mehrere dislozierte Satelliten zu empfangen
- es können mehrere „Nullen“, Stellen unterdrückten Empfangs gebildet werden, um Störer auszublenden („nulling“, „interference robustness“, „anti-jamming“)
- sie werden bislang in kleinen Stückzahlen hergestellt, also (noch) zu höheren Kosten.

Phased Arrays haben den gleichen Antennengewinn wie Parabolantennen gleicher Apertur, niedrigeres Gewicht, nur zwei Dimensionen, keine mechanisch beweglichen Teile bei der Nachführung und sie können Störer ausblenden. Im Falle eines mechanischen Einschlages funktioniert die Antenne weiter mit der Fläche, die nicht von dem Einschlag betroffen ist, während Parabolantennen nach einem Einschlag defokussiert und damit funktionsuntüchtig sind.

8.3.6 Hochfrequenzsender und -empfänger

Der Hochfrequenzsender (*RF Amp*) ist oft der Kostentreiber eines Terminals (die *Receive-Only* Einheiten, die nur einen rauscharmen Verstärker (*Low Noise Block*; *LNB*) und Frequenzumsetzer benötigen, sind die Ausnahme zu dieser Regel). Die geforderte Sendeleistung bestimmt die Kosten in den VSAT Anlagen. Die gesamte Sendekette beinhaltet den Leistungsverstärker (meist *Solid State Power Amplifier*; *SSPA*) oder den *Block Up-Converter* (*BUC*), der das Signal auf die Sendefrequenz umsetzt und es dann verstärkt.

Nur mit Standardisierung dieser Bauteile wird es der Satellitenindustrie möglich werden, die Kosten dieser Subsysteme wesentlich zu reduzieren, insbesondere auch die des *RF Transceivers*. Die Herstellungskosten des *SSPA* und/oder *BUC* können reduziert werden durch

- Standardisierung der Luftschnittstelle (*Air Interface Standards*)
- Produktion von *RF Chip Sets* in grösseren Stückzahlen zur Kostensenkung
- *Large Scale Integration* der Hochfrequenzbauteile mit *Baseband Chipsets*
- verbesserte Sendeverstärkereffizienz durch Linearisierung
- Verwendung von *Plastic Packaging*, *Surface Mount Technology* (*SMT*) und *Multi-Chip Module* (*MCM*) Technologie für automatisierte Herstellung und Prüfung (*Automated Assembly and Testing*).

8.3.7 Erdfunkstellenstandards

Die Hersteller von Bodenstationen und -geräten bieten laufend neue Leistungen und Funktionen an, um die Kosten für Kauf, Installation, Betrieb und Wartung der Stationen zu senken. Ein wesentliches Element ist hier die allgemeine Abkehr von proprietären Erdfunkstellenstandards hin zu offenen Standards (*Open Standards*). Diese führen für die Betreiber der Erdfunkstellen zu

- Interoperabilität, also niedrigeren Integrierungskosten
- breitem Wettbewerb, niedrigere Kosten und grössere Auswahl
- die Möglichkeit des *Upgrades*, kleineres Risiko der Obsoleszenz der Geräte.

Die *Open Standards* erlauben dem Hersteller erhöhte Integration, die die Kosten reduziert und die Zuverlässigkeit der Geräte erhöht. Die Standardisierung fördert die Zusammenarbeit der Hersteller und den Wettbewerb bei Subsystemen und Komponenten. Sie führt zu den *Commercial Off The Shelf* (COTS) Geräten und z.B. zu den DVB-RCS Terminals mit „*silicon-plus-software solutions*“ einschliesslich Digitaler Modems, *Intermediate Frequency* (IF) Modulatoren und „*embedded MAC layer protocol stacks*“.

Die Hersteller von Erdfunkstellen gehen in die Richtung „Open Standards“:

- das DVB-S (*Digital Video Broadcast – Satellite*) ist eine Luftschnittstelle (*Air Interface Standard*), die das Modulationsverfahren und die Codiertechnik für Audio, Video und Datenrundfunk (*Data Broadcasting Services via Satellite*) festlegt; dieser Standard wurde überwiegend von den DTH Service Providern angenommen (es gibt heute auch in den USA mehr als 20 Millionen Teilnehmer), wie auch bei den VSAT Herstellern und System-Integratoren für das *Outbound Link* in *Satellite Return Channel Broadband Access Networks*;
- DVB-DSNG (*Digital Video Broadcast – Digital Satellite News Gathering*) ist eine Erweiterung des DVB-S, die mit spektrumseffizienter 16QAM Modulation für *Satellite News Gathering* und *Contribution Services* eingesetzt wird;
- GMR (*Geo-Mobile Radio*) und GMPRS sind *Air Interface Standards* für leistungsvermittelten Mobilfunk (z.B. GSM) und paketvermittelten Datenfunk (z.B. GPRS) auch über Hochleistungs-L-Band Satelliten (z.B. Thuraya Satellite Telecommunications, Asia Cellular Satellite (ACeS) und Inmarsat-4;
- DVB-RCS (*Return Channel System*) und DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) sind konkurrierende Standards für breitbandigen Internet Zugriff, die preisgünstige Terminals, niedrigere Dienstleistungskosten und Interoperabilität versprechen; VSAT- und Komponentenhersteller entwickeln die *Hub Stations*, interaktive Terminals, Modem-Chipsets, *Protocol Stacks*, Testgeräte, *Third Party Security Applications* und *Performance Enhancements*;
- TCP/IP (*Transport Control Protocol/Internet Protocol*) ist der de-facto-Standard für die Kommunikation auf Netzebene (*Network Layer Communications*); Anbieter von Bodenstationen haben *Embedded Protocol Stacks* mit *Routing and Quality of Service* (QoS) und oft sogar in *Low Bit Rate Mobile Data Terminals* um die Netzkontrolle und -verwaltung zu vereinfachen und die Integration mit den Firmen-IT-Systemen zu erleichtern;
- IPoS (*IP over Satellite*) ist ein für allgemeine *Software Platforms* vorgeschlagener Standard; hier werden *Drivers* für *the Low Level Physical Interfaces* entwickelt, *Basic TCP/IP Functions* definiert, *Web Caching* (das Herunterladen grosser Dateien) und *Performance Enhancing Proxies* (PEP) hergestellt, die TCP- und HTTP-Verkehr via Satellit beschleunigen;
- MPEG ist eine Familie von Audio- und Videokomprimierungsstandards, die einen breiten Anwenderkreis, über *Broadcast* hinaus, gefunden haben; im

Verbund mit höherwertigen Modulationsverfahren (16QAM bis, zukünftig, 256QAM) führt dies zu deutlichen Bandbreiteneinsparungen; MPEG-4 ist das *Transport Stream* (TS) Format im DVB-S2 Standard, der auch *Multiplexing* von MPEG-2 TS und -4 TS und generische *Streams* mit IP-Verkehr unterstützt.

- die *Intelsat Intermediate Data Rate* (IDR) Modemtechnologie erlaubt Bodenstationen verschiedener Hersteller und Betreiber zusammen zu arbeiten.

8.3.8 Erdfunkstellentechnologietrends

Der Markt bietet heute fortgeschrittene Technologien um Satellitenfernsehen und -kommunikationsdienste für die Einzelnutzer und Unternehmen zu gestalten – von weiterentwickelten Terminaltechnologien mit rekonfigurierbaren *Software Defined Radios* bis zu *Low-Cost Ka-Band-Transceivers*. Der wesentliche Technologietrend in der Satellitenindustrie sind jedoch *IP Based Systems* um dem Wachstum von *Broadband Internet via Satellite* gerecht zu werden. Dieser Markt wird von *Multi-media Content Streaming* und *Multicasting Applications* getrieben, aber auch von den traditionellen Satellitendiensten wie Ruraltelephonie und *Broadcast TV over IP based Networks*.

Die meisten heutigen Terminals, *broadband* und *narrowband*, sind *IP Enabled* und unterstützen ein Bouquet von *Enhancements*, die Verbindungen über Satelliten für den Endnutzer transparent machen. Die nahtlose Integration mit der terrestrischen Infrastruktur ist eine Forderung jedes Systems, Festnetz oder Mobilfunk, und sie wird von Terminals mit *Embedded IP Stacks* erfüllt.

In den Breitband-Terminals werden oft einige *Value-Added IP Network-Features* integriert um Sicherheit, Leistung und Funktionalität zu steigern. Mit *Closed Set-Top Box* (STB) oder offener Software auf dem PC unterstützen diese Terminals Windows, LINUX oder auch in Echtzeit arbeitende Betriebssysteme, mit *Stand-Alone*-, *Client*- oder *Peer-to-Peer-Software*⁴ und/oder *Third Party Hardware* um die folgenden IP-Anwendungen zu implementieren:

- | | |
|---|---|
| – <i>Firewalls</i> und <i>Virus Scans</i> | – <i>Virtual Private Networks</i> (VPN) |
| – Verschlüsselung | – <i>Network Address Translation</i> (NAT) |
| – <i>Domain Name Server</i> (DNS) | – <i>Performance Enhancing Proxy</i> (PEP) ⁵ |
| – Caching | – Datenkomprimierung |
| – TCP-Beschleunigung | – <i>Pre-Fetching</i> |
| – <i>Web Caching</i> | – Desktop-Video-Konferenz |
| – VoIP (<i>Voice over IP</i>) | – Video- und <i>Audiostreaming</i> |
| – <i>IP-Multicasting</i> | |

Weitere wichtige Trends bei Bodenstationstechnologien sind:

- *Ka-Band Transceiver*: Der Start weiterer Breitbandsatellitendienste (wie *SpaceWay* und *WildBlue*) wird die Produktion von *Ka-Band Transceivers* antreiben:

⁴ *Peer-to-Peer Interchanges* sind Links zwischen *Internet Service Providers* (IPS)

⁵ Technologien, die die Leistung beim *Web Browsing*, e-Commerce und anderen Internet-Anwendungen steigern

- 3 W Sendeleistung im Bereich 29,5 bis 30,0 GHz mit Empfang bei 19,7 bis 20,2 GHz, der gesamte *Transceiver* integriert in einem Paket; Zielpreis ist \$200 bei Bestellung von 100 000 Einheiten;
- Linearisierung: Es werden vermehrt *Digital Signal Processing* (DSP) zur Linearisierung von Leistungsverstärkern eingesetzt; mit Prä-Kompensierung wird der Ausgang von nichtlinearen Modulatoren und Verstärkern in Amplitude und Phase linearisiert; diese Technologie, seit langem in Satelliten eingesetzt, senkt die Kosten der Hochfrequenz-*Transceiver* in Bodenterminals;
 - Höherwertige Modems: Bandbreiten- und leistungseffiziente Satellitenmodems mit höherwertigen Modulationsverfahren (16QAM etc.) und höchst wirksamer *Forward Error Correction* (FEC) Codierung (TPC und LDPC⁶) sind bereits auf dem Markt, für herkömmliche *Point-to-Point*;
 - Aufrechterhaltung der Signalqualität auch bei Regen mit adaptiven Bitraten, adaptiven Codiertechniken, adaptiven Modulationsverfahren und Lastabwurf, um die gedämpfte Signalleistung der verbleibenden Träger zu kompensieren;
 - *Software Radio*⁷: Satellitenterminals in der militärischen Anwendung sind für den Betrieb in mehreren Frequenzbändern und mit multiplen *Air Interface Protocols* ausgelegt und werden mehr in Software als in Hardware implementiert; *Software Radio* hat auch im kommerziellen Sektor Fuss gefasst; der Verfall der Kosten für die Signalverarbeitung ist deutlich;
 - *Hybride Terminals*: Bereits implementiert sind mobile Terminals (Handys), die verschiedene offene und auch proprietäre Standards verwenden, um Gespräche zu vermitteln und über terrestrische oder Satelliten zu routen;
 - *Advanced Videocompression*: MPEG-4 and WM9 Hardware- und Software-Decoder werden in Breitband-Satellitenterminals integriert, z.T. in Handys⁸.

8.4 Höhere Frequenzbereiche

Der lange anstehende Schritt zum nächst höheren Frequenzband im Spektrum, dem Ka-Band (30/20 GHz), wird endlich begangen, in Europa, USA und Asien. Der Fortschritt in den Satellitenkommunikationstechniken erstreckt sich insbesondere auch auf die Fachgebiete Signalmodulation und -codierung. Die Frequenzbänder für die ortsfeste Satellitenkommunikation (*Fixed Satellite Services*; FSS), Satellitenmobilfunk (*Mobile Satellite Services*; MSS) und Satellitenrundfunk (*Broadcast Satellite Service*; BSS) von 1 bis 100 GHz sind in Tabelle 8.1 gezeigt.

Die im Ku-Band entstandenen VSAT-Netze beginnen heute in das Ka-Band zu migrieren, wo ca. 3000 MHz Bandbreite verfügbar sind. Der nächste Schritt wird in das Q/V-Band sein, in dem weitere 3 000 MHz erschlossen werden können.

Danach folgt der Schritt in die Laser-Kommunikation, auch zwischen Satellit und Boden, die heute schon zum Teil operationell eingesetzt wird. Für die unterbrechungsfreie Dienstleistung ist hier auch nicht mehr notwendig, als schon für

⁶ *Low Density Parity Check Codes*, ein Codiervorgang, das die Shannon-Grenze erreicht

⁷ eigentlich *Software Defined Radio* (SDR)

⁸ z.B. Handys der Mobile Broadcast Satellite Corporation (MBSC) in Japan und in Süd-Korea

Tabelle 8.3 Frequenzbänder für *Fixed Satellite Services*; FSS, *Mobile Satellite Services*; MSS und *Broadcast Satellite Service*; BSS, von 1 bis 100 GHz, Region 1

Dienst	Bandname	Aufwärtsfrequenz	Abwärtsfrequenz
BSS	L-Band		1,452 – 1,492 GHz
MSS	L-Band	1,610 – 1,6605 GHz	1,525 – 1,559 GHz
		1,980 – 2,0100 GHz	2,170 – 2,200 GHz
BSS	S-Band	2,670 – 2,6900 GHz	2,4835 – 2,52 GHz
	S-Band		2,520 – 2,670 GHz
FSS	C-Band	5,150 – 5,250 GHz	3,400 – 4,200 GHz
		5,725 – 7,075 GHz	4,500 – 4,800 GHz
FSS/MSS	X-Band	7,900 – 8,400 GHz	7,250 – 7,750 GHz
FSS/BSS	Ku-Band	12,50 – 13,25 GHz	10,70 – 13,25 GHz
		13,75 – 14,80 GHz	15,43 – 15,63 GHz
	Ka-Band	17,30 – 18,10 GHz	
FSS	Ka-Band	27,50 – 31,00 GHz	17,70 – 21,20 GHz
BSS			21,40 – 22,00 GHz
FSS/BS	Q-Band	42,50 – 43,50 GHz	37,50 – 42,50 GHz
MSS		43,50 – 47,00 GHz	43,50 – 47,00 GHz
FSS	V-Band	50,40 – 51,40 GHz	47,20 – 50,20 GHz
MSS/FSS	W-Band	66,00 – 76,00 GHz	66,00 – 76,00 GHz
FSS/MSS		81,00 – 86,00 GHz	81,00 – 86,00 GHz

die Nutzung von 20/30 GHz (Ka-Band), insbesondere aber 43/46 GHz (Q-Band) getan wird - die verschiedenen übertragungstechnischen Eingriffe, Protokolle und topologischen Massnahmen zur Vermeidung von wetterbedingten Ausfällen.

8.5 Höherwertige Modulationstechniken

Der Fortschritt der Technologie in der Satellitenkommunikation erstreckt sich insbesondere auch auf die Fachgebiete Signalmodulation und -codierung. Hier kann eine weitere Steigerung der Nutzung des *Space Segments* durch den Einsatz höherwertiger Modulationsverfahren erreicht werden, die mehr Sendeleistung erfordern, aber mit weniger Bandbreite arbeiten. Die 16QAM- statt QPSK-Modulation bringt für 3 dB Leistungserhöhung die dringend benötigte Bandbreiteneffizienz (2 b/Hz statt 1 b/Hz) die für die breitbandige, interaktive Übertragung (*Broadband Interactive Multimedia*) benötigt wird.

Wichtig ist der Schritt zu QAM, weg von PSK; für das gleiche $E_b - N_0$ von 17,7 dB hat 16PSK 16 Baud (≈ 4 bit), 128QAM 128 Baud (≈ 7 bit, bei der gleicher Bitfehlerrate von 10^{-5}), fast eine Verdoppelung der Übertragungskapazität. Unbedacht ist auch die Wahl von 8QPSK, das drei bit pro Zustand transportiert; für nur 0,5 dB mehr Sendeleistung bekommt man 16QAM, das vier bit pro Zustand hat.

8.6 Intelligenteres Codiervfahren und Chiffriermethoden

Der Fortschritt in der Technologie der Satellitenkommunikation erstreckt sich insbesondere auch auf die Kanalcodierung. Die zeitgemässen Turbocodes für den Fehlerschutz der Übertragung auf dem Satellitenkanal bieten bis zu 10 dB Codiergewinn – ein Vorteil, der 10 dB Übertragungsleistung einspart, und damit auch die Übertragung in der Höchsthfrequenz ermöglicht.

Auf die iterative Verarbeitung der Codes wurde von Robert Gallager schon 1959 hingewiesen (mit seinem *Low Density Parity Check Code*, LDPC), es fehlte zu der Zeit jedoch noch die Prozessortechnologie, um dies in akzeptabler Echtzeit zu bewerkstelligen. MacKay und andere haben die Stunde der Realisierung erkannt, und wir können mit heutigen Prozessoren, deren Kosten kontinuierlich fallen, am Shannon-Limit arbeiten, der so genannte *Gap to the Limit* ist geschlossen.

8.7 Effektivere Nutzung mit höchster Signalkomprimierung

8.7.1 Sprachkompression

Die Kompression der menschlichen Sprache für die effiziente Übertragung ist ein interessantes Kapitel. Bereits 1976 wurde LPC10⁹ mit 2,4 kb/s in der NATO standardisiert. Die Signalqualität von 2,4 kb/s Sprache lässt nichts zu wünschen übrig. Dennoch haben die staatlich-monopolistischen Fernmeldebehörden Europas noch zehn Jahre später ISDN mit 144 kb/s Übertragungsrate eingeführt. Die Gebühr¹⁰ für die um den Faktor 60 zu hohe Bandbreite bezahlte der „Kunde“ (eine Vokabel, die es damals in diesem Umfeld nicht gab).

Auf der Telecom-Konferenz in Genf 1979, wurde ein 50 b/s Vocoder vorgeführt, der verständliche menschliche Sprache übertrug. Es wundert nicht, dass 50 b/s hierfür ausreichen, da das menschliche Hirn wohl nicht mehr als 50 bit/s verarbeiten kann, also alles, was über dieses Datenvolumen hinausgeht, ohnehin nicht wahrgenommen werden kann.

Erst mit den Mobilfunksystemen, terrestrisch und via Satellit (Iridium, Globalstar, Thuraya etc.) wurde dann (endlich) die 2.4 kb/s Übertragungsrate eingeführt. Vereinzelt findet man so genannte *Half-Rates* mit 1,2 kb/s (immer noch 24 mal mehr Daten als der Mensch aufnehmen kann).

8.7.2 Videokompression

Neben der Entwicklung des DVB-S2 wurden noch leistungsstärkere Kompressionen für Video und Daten erarbeitet. Video wird um 10% bis 12% pro Jahr verdichtet, seit rund zehn Jahren, mit Hardware und Software *Codecs* und Standards wie H.264, WM9 und MPEG-4. Im Gegensatz zu MPEG-2/DVB-S benötigt MPEG-4 nur 45%

⁹ *Linear Predictive Coder of 10th order*

¹⁰ in der Zeit der monopolistischen staatlichen Fernmeldebehörden war es eher eine Steuer, als eine betriebswirtschaftlich fundierte Abgabe

der Bandbreite für die gleiche Bildqualität und Robustheit. Mit DVB-S2/MPEG-4 können 20 bis 25 SDTV oder 5 bis 6 HDTV Programme in einem 36 MHz Satellitentransponder übertragen werden.

► **MPEG-4 benötigt nur 1/3 der Bandbreite von MPEG-2.**

Die Datenkompressionstechniken sind in den letzten zehn Jahren deutlich weiter entwickelt worden. Neue abstimmbare verlustfreie Context- und Nutzervokabular-abhängige Verfahren für die Komprimierung von statischem und dynamischen Web-Content, das oft sehr redundant ist, wurden entwickelt. *Single Pass Sequential Data Compression* Algorithmen erreichen Kompressionsraten von 5 : 1, in Echtzeit, im Gegensatz zu dem 2 : 1 mit herkömmlichen Technologien.

8.8 Dynamische Zugriffsverfahren

TDMA, SCPC und CDMA sind heute für bedarfsabhängigen (dynamischen) Vielfachzugriff (*Demand Assigned Multiple Access*; DAMA) verfügbar, und jedes dieser Verfahren hat seine Attribute und Kosten; die Auswahl des geeigneten Verfahrens für eine Anwendung hängt von den speziellen Anforderungen ab; die geschickte Auswahl macht die Nutzung der Übertragungsressource effizienter. Festgelötete *Point-to-Point* Verbindungen (*P-2-P Links*) da, wo nicht 24 Stunden am Tag durchgehender Verkehr ist, ist Ressourcen- und damit Geldverschwendung.

FDMA war der Vielfachzugriff der Wahl in der analogen Technik. Mit digitalen Signalen bietet sich TDMA als das bandbreiteneffizientere Verfahren an. Ideal wäre ein TDMA Summenträger im Transponder. Dieser könnte 64 Mb/s in 36 MHz übertragen, würde aber bedeuten, dass jeder Teilnehmer, auch der, der nur einen 1,2 kb/s Sprachkanal empfängt, den 64 Mb/s schnellen Empfänger benötigt.

Eine kostengünstigere Lösung war der Kompromiss eines FDMA/TDMA Hybridbetriebs, wobei vier TDMA Träger à 8 Mb/s in 36 MHz angeordnet wurden. Die Intermodulation der vier Träger war moderater als die von zwölf Trägern (und deutlich moderater als die im regulären FDMA Betrieb) und störte zudem die digitalen, störresistenten Träger weniger empfindlich als analoge Träger.

Heute erlauben *Digital Signal Processors* z.B. zwei Träger à 20 MHz, die zwar auch Intermodulation generieren, die den Wirkträgern Leistung wegnimmt, sie aber nicht beaufschlagt (ihnen kein Intermodulationsrauschen hinzufügt). Es ist abzusehen, wann die Gerätetechnik den Einzelträger mit 128 Mb/s 16QAM in 36 MHz ermöglicht; dann kommt 256 Mb/s mit 256QAM, das 4,0 b/Hz übermittelt.

CDMA ist nur in Sonderfällen von Vorteil, im kleinen Umfang und nicht für die Vermittlung grosser Datenvolumina, so dass die geminderte Bandbreiteneffizienz nicht von Bedeutung ist.

8.9 Operationell adaptive Sendeleistung

Adaptive Power Control

So wie fest gelötete *Point-zu-Point* Verbindungen die Übertragungskapazität verschwenden, können es auch festgesetzte Leistungspegel. Sendeleistungen für eine Funkstrecke werden für eine gewünschte Übertragungsqualität und Verfügbarkeit dimensioniert (s. Kap. 5). Die Linkverfügbarkeit einer Funkstrecke wird dann durch Funkstörung und das Wetter beeinträchtigt. Je höher die Frequenz, desto stärker schlagen Niederschläge zu. Um die Qualität während dieser Niederschläge aufrecht zu erhalten, muss eine entsprechend höhere Sendeleistung vorgesehen werden, aber eben nur während die Niederschläge andauern. Danach kann die Leistung adaptiv zurückgenommen werden (*Adaptive Power Control*; APC).

Da es im Mittel nur 10% der Zeit regnet, beaufschlagen Bodenstationen ohne APC den Satellitentransponder 90% der Zeit mit um die vermeintliche Regendämpfung zu hoher Leistung. Entweder treiben sie den Arbeitspunkt des Transponders dabei in die Sättigung, in der ungleich mehr Intermodulationsrauschen generiert wird (so dass die Streckenbilanz nicht mehr stimmt) oder man legt das System aus, dass sich der gewünschte Arbeitspunkt einstellt, wenn es nicht regnet, und hält Transponderleistung vor für den Regen; dann ist der Transponder 90% der Zeit untergenutzt, eine kostspielige Kapazitätsverschwendung.

Uplink Power Control ist seit dreissig Jahren marktverfügbar und kostengünstig und darf bei keiner Bodenstation fehlen, die nach wirtschaftlichen Vorgaben betrieben werden soll. Für die Leistungsregelung des Senders wird einfach die aktuelle Qualität am anderen Ende der Strecke beobachtet und der Zustand zurück gemeldet. Der empfangsseitige Decoder gibt in Echtzeit die Bitfehlerrate aus, die, zurück gemeldet, zur Nachregelung der Sendeleistung eingesetzt wird. Damit werden Signaldämpfungen durch Niederschläge auf der Aufwärtsstrecke kompensiert und der Qualitätsstandard aufrechtgehalten.

Die Reduzierung der Sendeleistung bei klarem Himmel (durchschnittlich 90% der Zeit) kommt auch der Lebensdauer der Sendeverstärker entgegen. *Adaptive Power Control* kann so ausgelegt werden, dass auch Signaldämpfungen auf der Abwärtsstrecke kompensiert werden. Die Aufrechterhaltung des nominellen Leistungsflusses auf der Abwärtsstrecke ist noch wichtiger als die der Aufwärtsstrecke wenn die Abwärtsstrecke der Flaschenhals der Übertragung ist.

Die Erfassung der meteorologisch verursachten Signaldämpfung erfolgt wie oben; die Separierung von Aufwärts- und Abwärtsstrecke wird durch den Vergleich mehrerer Bodenstationen erreicht. Verliert ein Link an Qualität, wenn benachbarte Stationen, die aus anderen Regionen empfangen, nominell weiter empfangen, dann muss es bei der *Uplink*-Station regnen und also ihre Sendeleistung angehoben werden. Fällt die Qualität einer Empfangsstation während die Qualität anderer, von der gleichen Sendestation bedienten Empfangsstationen nicht ab, dann muss es an dieser Station lokal regnen oder schneien und ergo die Satellitensendeleistung des Trägers zu dieser Station angehoben werden.

Die Kompensierung der Abwärtsstrecke durch Leistungssteigerung des Trägers auf der Aufwärtsstrecke wird so durchgeführt und verzerrt die Aufwärtsstrecke

auch nicht übermässig, da die Abwärtsstrecke immer im niedrigeren Frequenzband liegt (4 GHz statt 6 GHz, 11 GHz statt 14 GHz, 20 GHz statt 30 GHz etc.), so dass auch die zu kompensierenden Dämpfungswerte entsprechend kleiner sind.

Adaptive Power Setting

Neben der oben beschriebenen, temporären Leistungsnachregelung zur Kompensierung von Regendämpfung auf einzelnen Trägern, kann man auch die Transponderleistung als Ganzes dem Verkehr anpassen, am Eingang und am Ausgang des Transponders. Am Eingang sieht man ein Dämpfungsglied vor, das man während des Betriebs des Satelliten der aktuellen Nutzung entsprechend einstellt (*Gain Setting*). Wenn der Transponder vorwiegend von grossen Antennen angesteuert wird, dämpft man deren Leistung am Satelliteneingang, um den Transponder nicht zu übersteuern. Sind nur kleine Uplinkstationen in Betrieb, nimmt man die Dämpfung heraus. Dieses *Gain Setting* arbeitet typisch über einen Bereich von 20 dB und kann in Stufen (*Gain Steps*) von 1 bis 2 dB eingestellt werden.

Adaptive Power Mode

So wie fast alle Satelliten mit dem *Gain Setting* die Satelliteneingangsleistung kontrollieren, haben viele Satelliten verstellbare Ausgangsleistungen. Der einfachste Fall ist die Parallelschaltung von zwei Verstärkern zur Verdoppelung der Sendeleistung. Dies wurde schon bei INTELSAT-II (1966) angewandt: es wurden vier Röhren à 6 W parallel geschaltet, da es zu der Zeit noch keine stärkeren Röhren gab. Auch heute noch haben die Satellitenröhren begrenzte Leistungen (75 W im C-Band, 130 W im Ku-Band etc.).

In einem gängigen Satelliten mit etwa 100 Transpondern werden 125 bis 133 Röhren installiert, um Redundanz zu haben. In der „ersten Halbzeit“ der Satellitenmission werden diese meist nicht operationell benötigt, so dass sich ihr Einsatz in Parallelschaltungen anbietet.

Neben der Leistungserhöhung durch Parallelschaltung von Verstärkern verwendet man auch Verstärker variabler Leistung. Natürlich kann man jeden Verstärker bei beliebiger Ausgangsleistung betreiben, er nimmt dabei aber immer die Betriebsleistung auf, wie bei der maximalen Ausgangsleistung (der Sättigung).

Multi-Mode Amplifiers können im Gegensatz dazu auf einem Modus niedriger Leistung betrieben werden und nehmen dabei auch weniger Betriebsleistung auf. Gängig sind Röhren mit drei Leistungsstufen (u.A. bei Marisat 1976 geflogen; s. Kap. 9), die man zum Beispiel in der mittleren Leistungsstufe betreibt. Benötigt ein Transponder deutlich weniger Leistung, schaltet man ihn auf die niedrigere Stufe und kann mit der eingesparten Leistung einen anderen Transponder, der sie brauchen kann, in der höheren Stufe betreiben.

Diese *Multi-Mode Amplifiers* gehen auch einher mit Transpondern variabler Bandbreite, Transponderbandbreiten, die während der Mission dem Verkehr angepasst werden können (siehe folgendes Kapitel).

8.10 Verkehrsangepasste Bandbreite

Die Verkehrsprognose für die Auslegung einer Satellitennutzlast über ein Jahrzehnt und mehr zielsicher anzustellen, ist ein Ding der Unmöglichkeit. Deshalb, und auch aus Kostengründen, stattet man die Satelliten mit Standard-Transpondern (meist 36 MHz breit) aus; selten ist je ein Satellit im Orbit dann über alle seine Transponder hinweg homogen ausgelastet worden. Meist sind ein paar Transponder unterbelegt und in anderen Verbindungen reicht die Kapazität nicht. Deshalb sind Transponder mit digitalen Bandpassfiltern, die im Orbit dem aktuellen Bedarf angepasst werden können, ideal.

Solche *Tunable Transponders* werden im UHF Bereich seit langem eingesetzt; heute sind sie auch im Ku-Band im Gebrauch. Wichtig ist, dass sie so konstruiert sind, dass sie im Falle eines Ausfalls den Transponder nicht unbrauchbar machen, sondern auf einer nominellen, festen Bandbreite belassen. Weiterhin ist wichtig, dass sie mit variablen Sendeleistungen ausgestattet sind (siehe oben), so dass dem Transponder erhöhter Bandbreite zu Lasten dessen, dessen Bandbreite verringert wird, auch erhöhte Leistung zugeteilt wird.

8.11 Kanalangepasste Übertragung

Die Übertragungsstrecke von der Quelle zur Senke führt durch mehrere Engpässe, von denen die wetterabhängige Funkstrecke nur eine ist. Wenn die Senke nicht bei der Antenne ist, sondern über ein lokales Netz angebunden ist oder gar durch ein terrestrisches Netz führt, müssen weitere potentielle Schwachstellen durchlaufen werden. Das Ziel ist die Garantie der geforderten Qualität auf der Gesamtstrecke, deren Zustand durch die Messung der Bitfehlerrate am Ausgang der Strecke (im Kanaldecoder; *Channel Encoding/Decoder*) in Echtzeit erfolgt.

Die Erhöhung der Sendeleistung hilft nur gegen Ausbreitungsdämpfung, nicht z.B. gegen Überladung eines Netzknotens etc. Durch einfache Netzüberwachung können nicht durch Regen und Schnee verursachte Degradationen erkannt werden. Hier hilft dann nur die Reduktion der Übertragungsrate. Die variable Bitrate (*Variable Bit Rate*; VBR) für die kanalangepasste Übertragung ist Stand der Technik.

So wie die aktuelle Bitfehlerrate die Sendeleistung steuert, wenn ein Ausbreitungsproblem auf der Aufwärtsstrecke oder Abwärtsstrecke oder schlimmstenfalls auf beiden erkannt wird, regelt sie die laufende Bitrate, wenn das Problem nicht in der Ausbreitung liegt oder das Ausbreitungsproblem nicht durch weitere Leistungssteigerung behoben werden kann. Der Nutzer nimmt die etwas längere Übertragungszeit in Kauf, wenn er dafür fehlerfreie Daten erhält.

8.12 Respondierende Netztopologie

Alternative Pfade in einem Netz und konkurrierende Netze, die sich anbieten, werden mit den entsprechenden Kommunikationsprotokollen optimiert. Sowohl die

Optimierung des *Routings* in paketvermittelten Netzen als auch die Strategie, in einer End-zu-End-Verbindung, in der bereits ein *Satellite-Hop* durchlaufen wurde, nicht ein zweites Mal über Satellit zu gehen (INMARSAT), wurden vor dreissig Jahren operationell eingeführt. Protokolle im Mobilfunk, die eine gewünschte Verbindung für ein Hybrid-Handy auf den Satelliten nur dann legen, wenn kein terrestrischer Kanal frei ist, oder umgekehrt, oder terrestrisch ein Netz bevorzugt anwählen, gibt es seit zehn Jahren.

Eine Anwendung dieser Art ist die Handhabung von extremen Niederschlägen, die – insbesondere in der Höchsthfrequenz und bei optischen Links – nicht mehr durch Leistungserhöhung kompensiert werden können (Signalschwund > 30 dB). Diese Niederschläge kommen von schwer beladenen Wolken, die einen begrenzten Durchmesser haben (typischerweise < 10 km) und mit einer Geschwindigkeit meist geradeaus fliegen. Unter der Wolke ist der Empfang unterbrochen. Also *rouetet* man der Verkehr, wenn die Wolke aus dem Westen kommt, an eine am östlichen Stadtrand gelegene, diversitäre kooperierende Bodenstation, bevor die Wolke ankommt und bis kurz bevor sie den Osten erreicht (die Stationen sind heute hinreichend breitbandig terrestrisch vernetzt). Wenn das Westend wieder betriebsfähig ist, kann es den eigenen Verkehr zurücknehmen und Verkehr der östlichen Station übernehmen, bis auch auf diese wieder die Sonne scheint.

8.12.1 Netzarchitekturen

Entsprechend den Anforderungen an das Netz wird die optimale Topologie ausgewählt, im Wesentlichen aus den drei folgenden Möglichkeiten:

- das Sternnetz,
- das Maschennetz,
- das Hybridnetz.

8.12.1.1 Der Stern

Bei der Sternarchitektur läuft alle Kommunikation über die zentrale Nabe (*Hub*), in der auch die Netzkontrolle sitzt (s. Abb. 8.2). Diese Architektur eignet sich besonders für zentralistisch organisierte Betreiber (Banken, Versicherungen, Lotterien, Kfz-Hersteller etc.). Die *Hub-Station* kann direkt auf dem Gelände (an der Nachrichtenquelle) stehen, oder auch entfernt (z.B. auf dem Gelände des Betreibers), über eine terrestrische Anbindung angeschlossen.

Receive Only VSATs werden verwendet, wenn Daten nur von der Zentrale (*Hub*) an die Aussenstellen übermittelt werden müssen; diese VSATs sind nur für den Empfang ausgerüstet. Dabei kann eine Verbindung von der (nicht sendefähigen) VSAT zur *Hub Station* z.B. über das Telefonnetz oder IP erfolgen, für das *Network House Keeping* oder um Nachrichten abzusetzen. Da die Übertragungsstrecke VSAT-zu-VSAT im Sternnetz doppelt so lang (*Double Hop*) wie die direkte Übertragung via Satellit ist, eignet sie sich nicht für Sprache; die Signallaufzeit von ca. 0,5 s wäre störend und führte zu Sprechkollisionen (*Double Talk*).

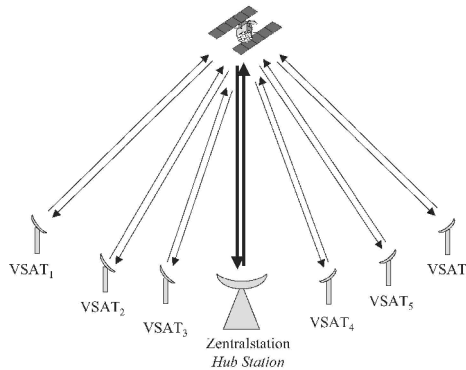


Abb. 8.2a Das Stern-Netz

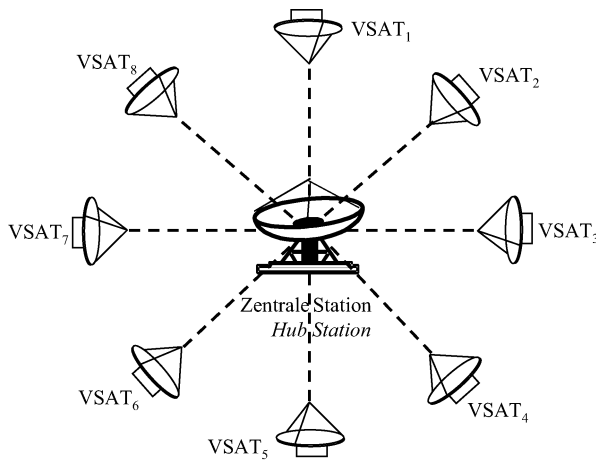


Abb. 8.2b Die Stern-Topologie

VSAT für den Verbund von *Personal Computer*, sog. *Personal Earth Stations* (PES) sind wohl die am meisten verbreiteten. Sie arbeiten in Sternnetzen mit der *Hub*, die auch zur Balancierung der Streckenbilanz beiträgt: Die grosse *Hub-Antenne* macht die kleinen VSAT-Antennen (*Remotes*) möglich. Der Antennendurchmesser der PES-VSAT ist $\leq 1,8$ m, die der Hub vier bis sechs Meter.

Häufig ist das *Outbound-Link* (zu den Remotes) in TDM mit 512 kbit/s bis 2 Mb/s ausgelegt, das *Inbound-Link* (zur Hub) in TDMA 128 kbit/s. Zusätzliche *Inbounds* wie auch weitere *Outbounds* können dem VSAT auf Bedarf zugeschaltet werden. Die Datenübertragung VSAT-zu-VSAT (also *Double Hop*) hat neben der Signallaufzeit das Problem der doppelten Satellitenkosten (weil zweimal über Satellit), so dass den niedrigeren Beschaffungskosten höhere Betriebskosten für die Dauer der Mission gegenüberstehen. Die Beschaffungskosten eines Sternnetzes umfassen:

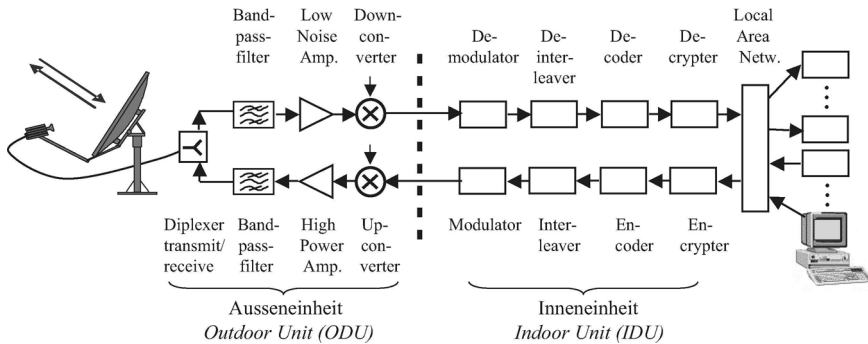


Abb. 8.3 Prinzipieller Aufbau der VSAT

- (1) Die Kosten der Hub-Antenne inkl. Nachführung, HPA, LNA, Up- und Down-Converter, Modems, Codecs, Network Control Processor (DAMA) Hard- und Software, Grundstück und Gebäude:
- (2) Die Kosten der Errichtung der Hub-Station mit Pedestal und Interfacility Links,
- (3) die Beschaffung der VSATs,
- (4) die Grundstücke für und das Aufstellen der VSAT, einschl. Blitzschutz
- (5) die Installation, Anbindung und Inbetriebnahme der VSAT (Commissioning),
- (6) die Betriebskosten des Systems incl. Network Control und Users' Help Desk (24 Std. pro Tag für Probleme der Teilnehmer besetzt) und die laufenden
- (7) Satellitennutzungskosten.

Der prinzipielle Aufbau einer VSAT ist in Abb. 8.3 gezeigt, der prinzipielle Aufbau der Hub Station ist ähnlich dem der VSAT – anstatt der PCs als Dateneneinheiten sind hier die Knotenrechner (Vermittlungszentren) der angeschlossenen Netze angebunden.

Die Network Control

Die Aufgaben und Eigenschaften der Netzsteuerung (Network Control) sind:

- die Nutzer im Netz zu registrieren und zu verwalten (Network Administration),
- die System Performance einschl. aller Remotes im Netz zu überwachen,
- den lastabhängigen und auch reservierten Zugriff auf das System zu betreiben,
- die Warteschlangen, wenn notwendig, und zeitlich versetzte Übertragungen zu verwalten,
- Accounting, Billing, Customer care (ABC), einschl. einem rund um die Uhr besetzten Users' Help Desk,
- Gateways zu Fest- und Mobilnetzen einschl. Standardkonvertierung (Transcoding der Sprechverbindungen), Bitratentranslation und Protokollumsetzung etc. zu betreiben.

So erlaubt die in der Hub installierte Network Control die gezielte Adressierung der VSAT durch einen dem Nutzdatenstrom vorangestellten Header. In ihm sind neben

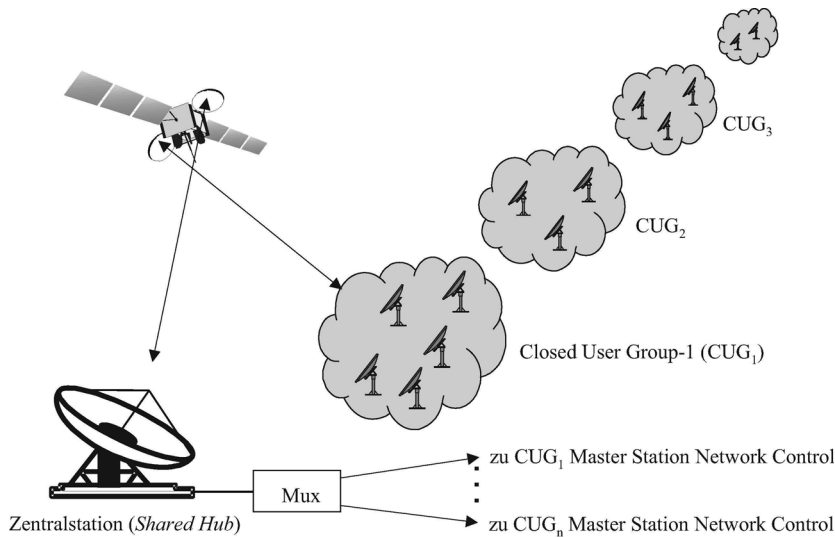


Abb. 8.4 Das Prinzip des Datenverteildienstes

dem Adressfeld noch Parameter, wie z.B. Empfangsfrequenzumschaltung, Schnittstellenkonfiguration, Überwachung der Übertragungsqualität etc. Die Intelligenz in der *Hub* ist so ausgelegt, dass ihre Funktion überwacht, Alarmer angezeigt und Redundanzen zugeschaltet werden können. Die Schnittstelle zum Anwender muss standardisiert sein, so dass gängige Datenendeinrichtungen angeschlossen werden können.

Es lassen sich geschlossene Nutzergruppen (*Closed User Groups*; CUG; s. Abb. 8.4) bilden; das *Broadcast* an alle wird zum *Multicast* an die Mitglieder der CUG.

Merkmale eines Satellitenverteildienstes

Die wesentlichen Merkmale eines satellitengestützten Datenverteildienstes, der kundengerecht angeboten werden kann, sind in Tabelle 8.4 gezeigt.

Tabelle 8.4 Merkmale eines satellitengestützten Datenverteildienstes

Kosten	Empfangsstation; Anbindung der <i>Hub</i> und Betrieb; Satellitenbandbreite und Zeit
Übertragungsqualität	von Transaktion zu Transaktion verschieden, gemäss Kundenwunsch, <i>Variable Bit Error Rate</i> (VBER)
Datenschutz	Verschlüsselung
Dienstverfügbarkeit	von 98,5% bis 99,9% der Zeit (Klimatone K), gemäss Kundenwunsch

Die Kosten müssen so liegen, dass sie neben dem Vorteil der Flexibilität des Satellitenfunks (Anbindung ohne verlegtes Kabel) die Kosten des terrestrischen Anschlusses unterbieten. Der Kostenbereich für eine komplette Empfangsstation liegt

je nach Ausstattung (Software, Datensicherheit etc.) im Bereich von 2 bis 20 k€. Die Betriebskosten für *Hub* und Satellit werden mit Betreiber und Satellitenorganisation (wie Eutelsat und Intelsat) verhandelt.

Die Übertragung wird so dimensioniert, dass der Anwender die gewünschte Qualität bekommt; BER von z.B. 10^{-7} für 99,9% der Zeit bedeutet, dass bei einer Bitrate von 2 Mbit/s alle 5 Sekunden ein Bit falsch sein darf. Wenn eine DINA4-Seite mit 100 kbit codiert wird, darf bei der Übertragung von 100 DINA4-Seiten ein Bit falsch sein – das leicht mit *Forward Error Correction* (FEC) korrigiert werden kann.

Die Datensicherheit muss gewährleisten, dass die übertragene Information von keinem Unbefugten empfangen werden kann. Dies wird durch Chiffrierung in *Hub* und VSAT realisiert – nicht über das Übertragungsverfahren.

Verfügbarkeit des Dienstes von 99,9% bedeutet, dass das gesamte Übertragungssystem,

- die Nachrichtenquelle beim *Hub* – terrestrische Anbindung der *Hub*
- die *Hub* – der Satellit
- die VSAT und – die Nachrichtensenke (z.B. PC beim Nutzer)

in 365 Tagen nur 8,76 h ausfallen darf. Die Verfügbarkeit, die Übertragungsqualität und die Datensicherheit gehen wesentlich in die Kosten des Datenverteildienstes ein. Die Schnittstellen des Datenverteildienstes zum Kunden müssen so ausgelegt sein, dass schon bestehende Terminals, Drucker etc. angeschlossen werden können und jeder Dienst übertragen werden kann.

In Tabelle 8.5 sind Beispiele von Satellitendatenverteildiensten aufgezählt.

Tabelle 8.5 Denkbare Nutzergruppen des satellitengestützten Datenverteildienstes

<i>Hub</i>	VSAT	<i>Hub</i>	VSAT
<i>Grossfirmen</i>	Werke	<i>Börsen</i>	Broker
<i>Baufirmen</i>	Grossbaustellen	<i>Presseagenturen</i>	Zeitungsverlage
<i>Reiseveranstalter</i>	Reisebüros	<i>Autoverleihfirmen</i>	Aussenstellen
<i>Speditionsunternehmen</i>	Frachtverteilbüros	<i>etc.</i>	Filialen

Die Empfangsstation

Die Empfangsstation (VSAT) ist in Aussen- und Inneneinheit unterteilt. Die Aussen-einheit besteht aus der Antenne, die im Boden verankert oder am Gebäude befestigt sein kann. Der rauscharme Vorverstärker (LNA) befindet sich im Brennpunkt der Antenne, um Verluste zu minimieren. Dem LNA nachgeschaltet ist der Frequenzumsetzer 1 (DC 1), der das Sendefrequenzband des Satelliten (z.B. 10,95–11,70 GHz) auf eine Zwischenfrequenz (z.B. 0,95–1,70 GHz) umsetzt. Dieses Signal wird mit HF-Kabel über 100–300 m zur Inneneinheit übertragen.

Die Inneneinheit befindet sich z.B. im Gebäude; von ihr wird die Ausseneinheit via HF-Kabel (Innenleiter) mit elektrischer Leistung (z.B. 15 V DC) versorgt, so dass keine 220 V zur Antenne transportiert werden müssen.

Das (noch modulierte) Empfangssignal wird im Frequenzumsetzer 2 (DC 2) auf eine Zwischenfrequenz (z.B. 70 MHz) gebracht und dem Demodulator zugeführt. Dessen Ausgang (die Basisbandsignale) wird via Demultiplexer (DEMUX) an die einzelnen (Standard-)Schnittstellen gelegt. Hier schliesst der Anwender seine Terminals an. Der Prozessor in der Empfangsstation hat folgende Aufgaben:

- Einschalt-Funktion (ON/OFF) und *Handling* der Empfangsstation in Bitrate
- Auswerten des *Headers*
- Demultiplexen, d.h. verteilen der Basisbanddaten
- Fehlerkontrolle/Fehlerkorrektur

Shared Hub

Es ist technisch und betriebstechnisch möglich, dass sich mehrere Netzbetreiber die grosse Zentralstation und gegebenenfalls den Netzkontrollrechner teilen, anstatt dass jeder seine eigene *Hub* beschafft und betreibt. Damit lassen sich die Investitions- und Betriebskosten pro Netzbetreiber beträchtlich reduzieren. Mit *Fire Walls* im Netzkontrollrechner bleiben die Einzelnetze separiert.

Shared VSAT

In gleicher Weise wie mehrere Netzbetreiber sich die grosse Zentralstation teilen, kann auch ein einzelnes VSAT von mehreren Teilnehmern an diesem Ort mitbenutzt werden. Mit einem zusätzlichen Modem für einen weiteren, unabhängigen Anschluss ist ein zusätzlicher Teilnehmer kostengünstiger am Netz als mit einem zusätzlichen VSAT. Gleichzeitig ist das Problem der Ästhetik reduziert, wenn nicht gleich mehrere (grellweisse) Parabolschüsseln auf dem Dach montiert sind.

Dies gilt für VSATs in Sternnetzen und umso mehr für die etwas grösseren Terminals in vermaschten Netzen.

8.12.1.2 Vermaschte Architekturen

Die Alternative zum Stern ist das vollvermaschte Netz (*Mesh Topologie*), in dem jede VSAT mit jeder anderen direkt (nicht über die *Hub*) verbunden ist (s. Abb. 8.5); die *Network Control* ist in einer beliebigen VSAT angesetzt und kann jederzeit an eine andere verlagert werden. Auch hier überwacht die *Network Control* den Verkehr im Netz und nimmt die Kanaluweisungen für die VSAT vor.

Da es im Netz keine *Hub* gibt, die mit ihrem grösseren Durchmesser die übertragungstechnischen Anforderungen an die VSAT mindert, sind die *Mesh VSAT* grösser (z.B. 2,4 m statt 1,8 m). Die höheren Kosten müssen jedoch im Gesamtrahmen der Satellitenkommunikation gesehen werden, in dem durch die immer engere Besetzung der Umlaufbahn der Störung von benachbarten Satelliten ohnehin nur durch grössere Erdfunkstellendurchmesser begegnet werden kann.

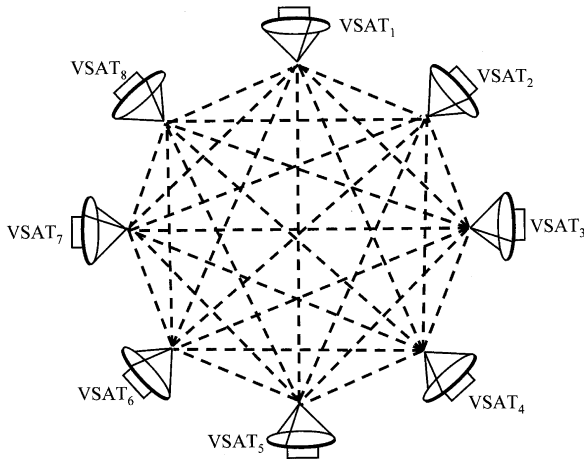


Abb. 8.5 Vollvermaschtes Netz mit n Knoten (Nodes) und $n - 1$ Verbindungen (Links)

Da alle VSAT direkt miteinander verbunden sind, sind *Mesh Topologies* geeignet, auch Sprache zu übertragen.

Die Dienste

Die SAT-Dienste können unterteilt werden in vermittelte und reservierte Transaktionen und Übertragungen auf Mietleitungsbasis:

- Vermittelte Transaktionen (*Switched Services*)
Dial Data Services, Batch Data Transfer, Fax, Image, E-Mail incl. Voice Mail, Broadcast and Multicast Voice
- Reservierte Transaktionen (*Reservation*)
Data Transmission, Broadcast and Multicast, Video Conference
- Transaktionen auf Mietleitungsbasis (*Leased Line Services*)
Simplex, Duplex.

Das Spektrum von SAT-Anwendungen beinhaltet Finanztransaktionen und *Point of Sale-Transactions*, Zentrale/Filialen-Kommunikation, Ruraler Telefonverkehr, Kreditkartenverifizierung, *Electronic Data Interchange* (EDI), Vertriebs- und Konzernnetze, Videokonferenzen, Distribution von Reklame, Reservierungen (Hotel, Flüge, *Last Minutes*, Mietwagen, Geräte etc.), elektronische Post, Echtzeit Inventarisierung, Verteilung von Unterhaltungsmusik für Einkaufsläden, Online Lottoannahme u.v.a.m.

Sprachnetze mit Kleinsterdfunkstellen

Für Sprachverkehr ist die *Telephony Earth Station* (TES) geeignet, die in einem Maschennetz arbeitet, das auch datenfähig ist. Der VSAT-Antennendurchmesser ist

z.B. 2,4 m; es gibt keine *Hub*; die *Network Control* ist mit einem beliebigen VSAT kolonisiert. Aller Verkehr geht *Single Hop* VSAT-direkt-zu-VSAT.

Alle *Links* sind *Single Channel Per Carrier* (SCPC) in FDMA oder TDMA mit 64 kbit/s bis 8 Mb/s. *Transcoders* wandeln Sprache von einer Bitrate in die andere. Auch im Datenverkehr sind niedrigere Bitraten (unter 64 kbit/s) möglich. Da TES-artige VSAT in der Vergangenheit in kleineren Stückzahlen als die PES verkauft wurden, ist ihr Preis immer noch höher als der der PES-artigen Stationen.

Rechnernetze mit Kleinsterdfunkstellen

Der Cadillac der VSAT ist eine vollvermaschte Architektur mit Übertragungsraten von 2 bis 8 Mbit/s, die sowohl Daten als auch Telefonverkehr unterstützen: Das VSAT für *Advanced Business Communications via Satellite*, das die verkehrsabhängige Vernetzung von *Local Area Networks* (LAN) auch unterschiedlicher Standards und Protokolle mit dynamisch-lastangepasster Kapazitätszuteilung unterstützt. Die Antennendurchmesser im Ku-Band reichen von 1,8 m an aufwärts. Die 2 bis 8 Mb/s Träger sind QPSK, zunehmend 16QAM moduliert und TDMA gesteuert, mit einem versatilen DAMA-Algorithmus, der die Nutzung der Satellitenkapazität optimiert. Diese Netzkontrolle ist in einem beliebigen VSAT untergebracht. Dieses System unterstützt auch grosse Netze oder viele LAN und grössere *Wide Area Networks* (WAN). Wenn man für Bitraten > 128 kbit/s plant, ist es ratsam, zu Beginn *Advanced Business Communications* zu nehmen, anstatt in ein billigeres Netz zu investieren und dieses dann später abzulösen; das leistungsfähigere Netz kann sofort ein schmalbandiges emulieren, aber nicht umgekehrt.

Satelliten-EIRP

Die Bodenstation empfängt mehr Pegel von dem Satelliten, dessen Bedeckungsgebiet kleiner ist, als von einem Satelliten (gleicher Sendeleistung) mit grösserer Ausleuchtung. Die Relevanz des EIRP-Wertes auf die Verwendung des jeweiligen Satelliten für den Datenverteilendienst ist evident.

Die Tabelle 8.3 zeigt die Übertragungsparameter für 34 Mb/s, kleinste Empfangsantennen, eine Bitfehlerrate BER von 10^{-5} , bei Verwendung von 16QAM. Damit ergibt sich am Demodulatoreingang ein Soll-Träger/Rauschleistungs-Verhältnis

$$\begin{aligned} C-N_{o, \text{Soll}} &= E_b - N_o + 10 \log(\text{Bitrate}) - \text{Codiergewinn} + \text{Implementierungsmarge} \\ &= 13,5 \text{ dB} + 75,3 \text{ dB/s} - 4 \text{ dB} + 2 \text{ dB} = \\ &= 86,8 \text{ dBHz} \end{aligned}$$

Dem steht das verfügbare Ist-Träger/Tauschleistungs-Verhältnis gegenüber

$$\begin{aligned} C-N_o &= EIRP - BO_{\text{out}} - BO_{\text{Anteil}} - PL + G-T - K \\ &= 55 \text{ dBW} - 3,8 \text{ dB} - 5,2 \text{ dB} - 206 \text{ dB} + 24 \text{ dBi/K} + 228,6 \text{ dBJ/K} = \\ &= 92,6 \text{ dBHz} \end{aligned}$$

Tabelle 8.6 Übertragungsparameter des Systems Hub Station/Satellit/VSATC- und Ku-Band

Uplink- und Downlink-Frequenz (GHz)	14	11	gesamt
Funkfelddispersion (dB)	206,0	204,0	
Atmosphärische- und Regendämpfung ¹¹ (dB)	3,0	2,0	
EIRP _{HubStation} /Satellit (dBW)	72,0	55,0	
Input Backoff/Output Backoff (dB)	8,3	3,8	
$G \cdot T_{\text{Satellit}} / G \cdot T_{\text{HUB}}$ (dBi/K)	14,0	24,0	
G_{VSAT} (dBi) 1,8 m Ø, 60%	46,0	44,0	
G_{Hub} (dBi) 4,0 m Ø, 60%	52,0	50,0	
T_{VSAT} (dBK)		20,0	
$G \cdot T_{\text{VSAT}}$ (dBi/K)		24,0	
$G \cdot T_{\text{Hub}}$ (dBi/K)		31,0	
$C \cdot N_o$ (notwendig, in dBHz)		86,8	
$C \cdot N_o$ (verfügbar, in dBHz)	105,0	92,6	89,8 ¹²
Systemreserve (dB)		3,0	

Die Tabelle zeigt die Systemreserve für einen Stand-der-Technik Satelliten. Diese kann verwendet werden, um

- die Dämpfung bei Regen und Schneefall auszugleichen,
- die elektrische Sendeleistung der *Hub* zu verringern,
- den Antennendurchmesser der *Hub* zu verkleinern,
- den Antennendurchmesser der VSAT zu verkleinern oder
- billigere Empfänger höherer Rauschtemperatur im VSAT zu verwenden
- eine bessere Qualität anzubieten (kleinere Bitfehlerrate BER).

In der Praxis wählt man eine geschickte Kombination dieser Massnahmen.

Wie aus der Tabelle weiterhin ersichtlich, eignen sich herkömmliche Nachrichtensatelliten für Datenverteilendienste auch mit kleinen Empfangsanlagen. Es sind keine aufwendigen Installationen für die Antennen notwendig.

8.12.1.3 Hybride Architekturen

Hybride Netze beinhalten eine zentrale Station, in der auch die Netzkontrolle untergebracht ist. Eine Untermenge aller VSAT haben Direktverbindungen untereinander (Vermaschung); der Rest hängt sternförmig am *Hub* (s. Abb. 8.6).

Es kommen in dieser Hybridform *Single Hop*- und *Double Hop*-Verbindungen vor; die Vorteile beider Systeme (und ihre Kosten) sind in einem Netz vereint. Es kann z.B. Sprache im *Single Hop* und Daten im *Double Hop* übertragen werden; die endgültige Auswahl der Netzarchitektur richtet sich nach den Anforderungen des Verkehrsprofils.

¹¹ 99% der Zeit in Klimazone K oder besser

¹² = $C \cdot N_{\text{abw}}$ abzüglich $C \cdot N_{\text{aufw}}$ (0,3 dB), $C \cdot N_{\text{intermod}}$ (1,5 dB) und $C \cdot N_{\text{interf}}$ (1,0 dB)

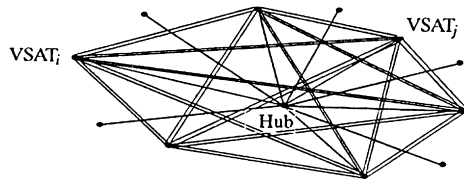


Abb. 8.6 Die hybride VSAT-Netzarchitektur

8.12.1.4 Vergleich der Architekturen

Die zentrale *Hub* der Sternnetze wird verwendet, um die Anforderungen an die Sende- und Empfangsleistungen der VSAT zu minimieren. Mit ihrem grösseren Antennendurchmesser (4 bis 6 m) und Sendeverstärker höherer Leistung (ca. 100 W), kann sie die niedrigeren Leistungsdaten der VSAT ausgleichen. Diese Lockerung der Anforderungen an die VSAT beträgt aber maximal 3 dB:

Wenn in einem symmetrischen Link (Maschennetz) $C-N_{\text{up}} = C-N_{\text{down}} = 20$ dB, dann ist $C-N_{\text{total}} = 17$ dB; wenn in einem asymmetrischen Link (Sternnetz) die Verbindung zur *Hub* ein sehr gutes $C-N$ aufweist, darf die Verbindung zur VSAT $C-N_{\text{down}} = C-N_{\text{total}} = 17$ dB sein, also 3 dB niedriger – nicht mehr! Der Antennengewinn kann um 3 dB niedriger, also der Antennendurchmesser um 1,5 dB oder den Faktor $\sqrt{2} = 1,4$ kleiner sein; statt 2,4 m reichen 1,8 m. Die kleinere Antenne setzt sich aber sehr viel mehr der Funkstörung durch benachbarte Satelliten aus, so dass der Nutzer gut beraten ist, dennoch 2,4 m zu nehmen. Der grössere Durchmesser reduziert auch die Anforderungen an die Sendeleistung der VSAT, ein wesentlicher Kostentreiber (8 W Sender kosten dreimal so viel wie 4 W Sender). Für den etwas grösseren Antennendurchmesser sprechen die Systemaspekte:

- die kleinere Funkstörung von den benachbarten Satelliten,
- die kleinere Funkstörung in die benachbarten Satelliten,
- der kostengünstigere Sendeverstärker,
- das kostengünstigere Empfangssystem,
- die halb so hohen Kosten für das Raumsegment bei VSAT-zu-VSAT-Links.

Mesh-VSAT arbeiten mit 2,4 m, Stern-VSAT könnten mit 1,8 m Antennen arbeiten, wenn nicht die In Orbit Interference auch die Stern-VSAT zunehmend zwingen würde, auf 2,4 m zu gehen.

Im Einzelfall wählt man die für die Anwendung am besten geeignete Topologie aus. Wenn man auch PC vernetzen oder *Local Area Networks* verbinden möchte, ist die Wahl einfach: Das kann nur die *Advanced Business Communications*-Klasse (Tabellen 8.7 und 8.8). Wenn mehr als 64 kbit/s übermittelt werden sollen, ist auch dies nur mit *Advanced Business Communications* möglich (bis zu 8 Mbit/s und mehr). Wenn es nur um Telephonie geht, aber jede Station mit jeder anderen Station sprechen können soll, dann reicht die etwas billigere TES-Klasse.

Wenn alle VSAT nur Verbindung mit der zentralen *Hub* benötigen und nicht untereinander kommunizieren, kann man auch die noch billigere PES verwenden.

Mann muss die Rechnung aber sorgfältig machen: Zu den Kosten der PES kommen die für die *Hub Station* (je nach Auslegung zwischen 300 und 500 k€).

Wenn doch VSAT-zu-VSAT Verkehr ist, muss dieser – der über die zentrale *Hub* läuft – zweimal über den Satelliten (vom VSAT via Satellit zur *Hub Station* und dann noch mal via Satellit zum anderen VSAT), und damit werden die Satellitenkosten verdoppelt, so dass oft die PES teurer wird, als die TES.

Wenn der Kunde heute zwar keine *Local Area Networks* hat, sie aber in ein, zwei Jahren haben wird, ist es ebenfalls falsch, die billige PES oder TES anzuschaffen, und sie dann gegen die *Advanced Business Communications* auszutauschen; es ist billiger, gleich auf das zukunftssträngige System zu gehen.

Wenn der Kunde mit seiner Zentrale 17 000 Tankstellen europaweit erreichen können möchte und die *Remotes* nicht untereinander sprechen müssen, ist der Stern die Lösung.

Tabelle 8.7 Zusammenfassung PES, TES und Advanced Business Communications

Typ	Topologie	Hub	Zugriffstechnik	Datenrate	Kosten
PES	Sternnetz	Ja	TDMA/TDM	≈ 16 kbit/s	10 k€ plus Hub
TES	Maschennetz	Nein	SCPC/FDMA	64 kbit/s	15 k€ plus DAMA
„Cadillac“	Maschennetz	Nein	<i>Fast Packet Switch</i>	≥ 8 Mbit/s	25 k€ plus DAMA

Tabelle 8.8 Übersicht über alternative Netze

Netztyp	Anwendungen	Bitraten	Kosten	Vorteile	Nachteile
Satellit	profess. und private Anw.	300 bit/s bis 8 Mbit/s	8 ... 30 k€	Flexibel, zuverlässig	keine Gbit/s
Mietleitung	Daten und Sprache	128 kbit/s	0,1 ... 1 k€/Monat/Tln	Global verfügbar	starres Netz
Fiber-Optik	Daten, Sprache und Video	Gbit/s ... Tbit/s	1 000 k€/Monat und Verbindung	Bandbreiten- Arbitrage möglich	nicht geeignet für kleine Netze

Fallbeispiel: Für wie viele VSAT wird *Star* billiger als *Mesh*?

Die Kosten für ein Sternnetz mit n VSAT und einer *Hub* seien

$$\begin{aligned}\text{Kosten}_{\text{star}} &= n \cdot 10 \text{ k€ pro VSAT} + n \cdot 10 \text{ k€ für Installation pro VSAT} + \\ &\quad 350 \text{ k€ für Hub incl. Installation} + 150 \text{ k€ für} \\ &\quad \text{Network Control} = n \cdot 20 \text{ k€} + 500 \text{ k€}\end{aligned}$$

Die Kosten für ein Maschennetz mit $n + 1$ VSAT ohne *Hub* sind

$$\begin{aligned}\text{Kosten}_{\text{mesh}} &= n \cdot 20 \text{ k€ pro VSAT} + n \cdot 12 \text{ k€ für Installation pro VSAT} \\ &\quad + 150 \text{ k€ Network Control} = n \cdot 32 \text{ k€} + 150 \text{ k€}\end{aligned}$$

$$\text{Kosten}_{\text{star}} = \text{Kosten}_{\text{mesh}} \text{ bzw. } n \cdot 20 + 500 = n \cdot 32 + 150 \rightarrow n \geq 29 \text{ VSAT.}$$

FAZIT: Für $n > 29$ VSAT wird das Sternnetz (trotz *Hub*) in der Beschaffung (ohne Betriebskosten!) billiger als das Maschennetz.

Bei vermaschtem Verkehr ist dessen Ausmass massgebend. Er führt in Sternnetzen zu doppelter Satellitenkapazität und intolerabler Zeitverzögerung. Angenommen, auch nur 1/3 des Verkehrs in einem Netz geht VSAT-zu-VSAT, dann beträgt die Satellitenrechnung 133% durch die *Double Hops*. Wenn die Rechnung z.B. 25 k€ pro Monat oder 0,3 M€ p.a. beträgt, bedeutet dies Mehrkosten in 10 Jahren von 3 M€. Damit wird der *Trade Off*:

$$\text{Kosten}_{\text{mesh}} = n * 32 \text{ k€} + 150 \text{ k€ und}$$

$$\text{Kosten}_{\text{star}} = n * 20 + 500 + 3000 \text{ k€, also}$$

$$n * 32 + 150 = n * 20 + 3500 \text{ k€, somit ist } n \geq 270 \text{ VSAT.}$$

FAZIT: Erst ab ca. 300 VSAT rechnet sich die Sternarchitektur vis à vis dem Maschennetz, wenn über eine Missionsdauer von 10 Jahren gerechnet wird.

8.12.1.5 Zusammenfassung

Die Satellitenübermittlung ist komplementär zur terrestrischen Übertragung, ein integraler Teil der *Global Information Infrastructure* (GII), die sicherstellt, dass GII schnell flächendeckend verfügbar wird. Besondere Kostenvorteile bieten Satelliten-Netze bei Broadcast: Mit nur einem Satellitenkanal kann Information (Nachrichten, Börsen- und Währungskurse, *Last Minute* Angebote etc.) an beliebig viele Orte übermittelt werden. *Multicast* ist *Broadcast* eingeschränkt auf die, die für den Dienst bezahlen. Ein Beispiel sind Weiterbildungskurse – ein VSAT-Dienst mit zunehmender Anwendung, nicht nur in der Dritten Welt.

Satellitenmitleitungen können sowohl für Paketvermittlung als auch für Festverbindungen auf der Basis von *Single Channel Per Carrier* (SCPS) verwendet werden. SCPC-Übertragungsraten reichen über 2 Mbit/s bis 34 Mbit/s. Die Effizienz der Bandbreitennutzung hängt von der Qualität des DAMA ab.

8.13 Zeitgemässes Protocol Engineering

SITs arbeiten heute mit Internet, TCP-IP, X.25¹³, PAD¹⁴, *Frame Relay*, *Routers/ Bridges*, ATM¹⁵, SLIP¹⁶, SNA¹⁷ etc., einer Vielzahl von Protokollen für Sprache und Breitbanddaten einschl. LAN (*Local Area Networks*) Verfahren.

Im Unterschied zur Terrestrik kann innerhalb der Satellitenausleuchtzone jeder Teilnehmer senden und empfangen, ohne an die geographische Abdeckung

¹³ einem Paketvermittlungsprotokoll der Ebene xyz

¹⁴ *Packet Assembly / Disassembly*, ein Protokoll zur Link-Kontrolle

¹⁵ *Asynchronous Transfer Mode*, eine Paketvermittlung

¹⁶ *Serial Line IP*

¹⁷ *System Network Architecture*

und an starre Bitraten eines Kabelnetzes gebunden zu sein. Besonders in der Geschäftskommunikation ändern sich die Anforderungen der Nutzer stetig. Ist man heute mit Bitraten von n 2 Mbit/s zufrieden, sind morgen m 34 Mbit/s gefragt. Für die Übertragung via Satellit mit kleinsten Antennendurchmessern sieht man

- den Datenverteildienst (*Broadcasting*): Daten an alle (*Point to Multipoint*),
- einen Datendienst (*Multicasting*): Ich sende Daten an viele (*Point to Multipoint*),
- den interaktiven Datenverkehr: Die Nutzer senden und empfangen.

Dies kann in Netzen mit Sterntopologie wie auch in vermaschten Netzen erfolgen.

8.14 Stand der Technologie

8.14.1 DVB-RCS und DOCSIS Protokolle

DVB-RCS (*Digital Video Broadcast Return Channel via Satellite*) and DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) sind die zwei gängigen Standards für breitbandigen Internet-Zugriff. Beide versprechen *Low-Cost Terminals*, niedrige Übertragungskosten, Interoperabilität und *Market Scalability*.

DVB-RCS ist ein von vielen Satellitenbetreibern und Gerätevertreibern unterstütztes Satelliten-Air Interface Protocol. DOCSIS ist ein um einige Satelliteneigenschaften modifizierter Kabelstandard. Beide stimulieren den Wettbewerb und helfen, die Preise zu senken sowie den Betrieb von *Gateways* und interaktiven Terminals verschiedener Hersteller.

DVB-RCS hat zur Entwicklung von *Application Specific Integrated Circuits* (ASIC) in Silikon geführt, mit der physikalischen Protokollebene und den *Media Access Control* (MAC) Funktionen (dem *Air Interface Protocol*), also einem kompletten Terminal auf einem multifunktionellen Chip,

- mit kleinster Grösse
- höchster Zuverlässigkeit
- geringstem Leistungsverbrauch
- niedrigsten Bodenterminalgesamtkosten.

Ein Ziel bei der Entwicklung des DVB-RCS Standards war die Interoperabilität aller DVB-RCS zertifizierten Produkte und Dienste; noch sind einzelne Produkte nicht mit der DVB-RCS *Multiple Frequency TDMA* (MF-TDMA) Zugriffstechnologie kompatibel.

DOCSIS, der alternative Standard für breitbandigen Internet-Zugang via Satellit, ist in Kabelnetzen bereits weit verbreitet. Die kostengünstigen Chipsets mit *Embedded Network and Subscriber Management Functions* bieten Vorteile für Satellitenbetreiber wie Diensteanbieter. Bodenterminals können auf weit reichende kommerzielle *Off-the-Shelf* Technik zugreifen, so dass der DOCSIS Standard mit seinen niedrig-Kosten-Customer Premise Equipment (CPE) im Verhältnis zu den inzwischen klassischen VSATs deutliche Vorteile bringt. Mittelfristig werden diese niedrigen Kosten auch von DVB-RCS erreicht, das auch die Leistungsmerkmale von „DOCSIS via Satellite“ in Bandbreiteneffizienz und Kosten erreicht.

8.14.2 Der DVB-S2 Standard

DVB-S, DVB-DSNG und DVB-RCS Hersteller werden durch die jüngste Ausgabe des DVB-S2 Empfänger-Chipsets deutlich unterstützt. Empfängerchips für interaktives DVB-S2 (ATM fähig) werden in kleinen Stückzahlen 50 Euro kosten und weniger als 15 Euro in grossen (s. Abb. 8.7). Obwohl sie damit zwei bis drei Mal so teuer sind wie die für *Broadcast*, sind sie für interaktive Anwendungen attraktiv, auch weil sie in der Systemkapazität aufwuchsfähig sind.

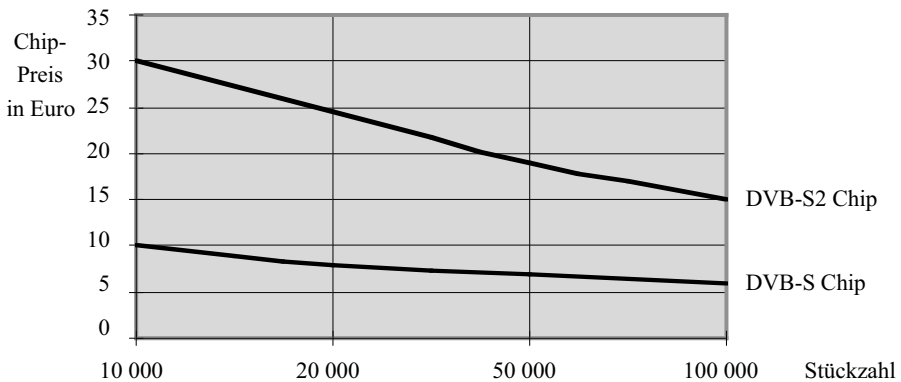


Abb. 8.7 Die Kosten der Empfänger-Chips von DVB-S und DVB-S2 versus Stückzahl

8.14.3 Kosteneffektive Systemlösungen

Gefragt sind kosteneffektive, rasch implementierbare Systeme, die einen grossen Bereich von Anwendungen abdecken und eine gewisse Lebensdauer aufweisen.

8.15 Breitbandsatellitensysteme

8.15.1 Netze mit Kleinsterdfunkstellen bei höheren Frequenzen

Ultra Small Aperture Terminals (USAT) und μ SAT wurden lange als die nächste Generation SAT vorhergesagt, nicht nur für Ka-Systeme sondern auch für den Einsatz mit Ku-Satelliten für Breitbandübertragungen. Sie wurden speziell für tief fliegende Satelliten wie *SkyBridge* und *Teledesic* (700 km Flughöhe) vorgesehen. *Teledesic* hat seine Pläne fallen lassen und die Lizenz an die Regulierungsbehörde zurück gegeben, und um *SkyBridge* ist es auch ruhig geworden.

Die Verbreitung der USAT ist immer noch spärlich. Es gibt wenig Produkte und ebenso wenig Satelliten. Der Einsatz von USAT wird auf trockene Klimazonen konzentriert sein. In Hong Kong wird im Ka-Band eine grössere Antenne als im

Ku-Band erforderlich (und im Ku-Band eine grössere als im C-Band), weil man die *Additional Rain Attenuation* kompensieren muss.

Zwei der zwanzig „*Internet-in-the-Sky*“-Systeme, die zur Zeit des „Neuen Marktes“ proklamiert wurden, werden wohl realisiert - die wesentliche Grundlage für die zukünftige *Global Information Infrastructure* (GII). Im Gegensatz zu VSAT, die im Ku-Band arbeiten, liegen USAT im Ka- und Ke-Band. Damit wird der erforderliche Antennendurchmesser theoretisch noch kleiner. Ob dies im Einzelfall zutrifft, hängt sehr stark von der Klimazone und der geforderten Dienstverfügbarkeit ab.

8.15.2 Das ACTS der NASA

Der *Advanced Communications Technology Satellite* der NASA zur Förderung der US-Satellitenindustrie, von Lockheed Martin gebaut (363 Mio Euro) wurde 1993 (mit einer Lebensdauer von 5 Jahren) auf 100°W/GEO gebracht. Die Satellitenkontrolle erfolgt vom NASA *Master Control Center* (MCS) im Lewis Research Center, Cleveland (Ohio) für die Plattform, die Netzkontrolle von LM in East Windsor (NJ). Das ACTS beinhaltet folgende Technologien:

- Erzeugung einer Zellularstruktur am Boden mit 100 Zellen in den 28 Staaten der USA,
- *Hopping Spot Beams* hoher Leistung (*high gain hopping spot beams*) im Verkehr mit kleinen Terminals
- SAT kleinsten Durchmessers, für *Business Communications*; Terminals werden von der *US Army* im transportablen Einsatz betrieben;
- bordseitige Vermittlung der Signale (*TDMA Satellite On-Board Switching*),
- Basisband-Verarbeitung der Signale im Satelliten (*On-Board Processing*, OBP; Satellitengeräte von Motorola, Bodeneinrichtungen von COMSAT),
- lastabhängige Kapazitätszuteilung (*Demand Assignment*; DAMA)
- Übertragung in der Höchsthfrequenz; Ka-Band (20/30 GHz) mit extrem hohen Bandbreiten (ca. 1 GHz), auch zum mobilen Teilnehmer (Land, Flug und See);
- adaptive Regendämpfungskompensierung (*adaptive rain fade compensation*).

Einzelne Spots werden auf Zielerdfunkstellen mit Verweildauern im Millisekundenbereich gerichtet, Daten höchster Bitrate abgesetzt, und die Spots in Nanosekunden zum nächsten Ziel geschwenkt. Damit kann die Zahl der vom Satelliten gleichzeitig erzeugten *Spotbeams* auf einen Bruchteil der Zahl der Zielerdfunkstellen begrenzt werden. Der präoperationelle Satellitenbetrieb beinhaltet z.B.:

- T1-Verbindungen zum Nutzer (1,544 Mbit/s), einschl. ISDN-Diensten,
- Hochgeschwindigkeitsdatennetze (OC-12 622 Mbit/s, zum Verbund von grossen Rechnernetzen und Verbund von Supercomputern der NASA, des National Center for Atmospheric Research und des Ohio Supercomputing Centers),
- Programmverteilung von HDTV (*High Definition TV*; 16 × 9 Bildseitenverhältnis),
- Sprach- und Datenverbindungen zum Flugzeug mit Terminals mit *Phased Array Antenna* und mit Terminals, entwickelt von JPL und Rockwell, für breitbandige Übertragung von Sprache, Daten und Video zum Flugzeug,

- Terrestrischer Mobilfunk mit niedrigen Datenraten zu Terminals im Fahrzeug (2,4 bis 64 kbit/s; vom JPL entwickelt),
- USAT für Dateneinholung (*Supervisory Control and Data Acquisition*; SCADA, für Übertragungsraten von 4,8 kbit/s im Einsatz zur Überwachung von z.B. Hochspannungsleitungen etc.),
- Ausbreitungsversuche mit Massnahmen zur adaptiven Regendämpfungskompensierung, durchgeführt von der COMSAT, die seit 20 Jahren – angefangen im ATS-Programm - auf der 20/30 GHz-Ausbreitung arbeitet.

Weitere im ACTS-Programm entwickelte Terminal-Geräte sind z.B.:

- das Streckenüberwachungsgerät (*Link Evaluation Terminal*; LET, von NASA-Lewis) zur Bewertung der ACTS-Transponder entwickelt, das sowohl Transponderparameter überwacht, als auch die Ausrichtung der *Spotbeams*,
- das Hochgeschwindigkeits-Modem (*High Data Rate Terminal*; HDR, gefördert von NASA und ARPA) für 155 und 622 Mbit/s,
- das Empfangsgerät (*Receive Only*) für die Ausbreitungsmessung, entwickelt vom *Virginia Polytechnic Institute* (acht Einheiten im Einsatz).

Im ACTS-Programm wurden alle die eingangs beschriebenen zukunftssträchtigen Dienste mit neuen Technologien erprobt, um mehr Nutzer zu erreichen und gleichzeitig die Kosten zu senken. Die Industrie erprobte Videokonferenzen, Banken arbeiteten ohne jegliche terrestrische Verbindungen, Kliniken (*Mayo Clinic*, *Krug Life Science*, TEN) experimentierten mit Telemedizin, Unis erprobten neue Dienste, die *Army* sendete Festbilder und TV ins Hauptquartier und an die Front und Regierungsstellen erprobten den Einsatz von ISDN.

Das *National Communications System* (NCS) erprobte Katastrophenkommunikation für den Ausfall des terrestrischen Netzes. Im Richtfunk-Betriebsmodus wurden 900 Mbit/s über ACTS geroutet und so auch grössere Richtfunkstrecken ersetzt. Das Programm erstreckte sich über 81 Monate. MOTOROLA nutzte die Basisband-Verarbeitung der Signale (*On-Board Processing*, OBP) als Entwicklungsstufe für IRIDIUM, das ebenfalls OBP und 20/30 GHz Strecken zwischen den Satelliten und der Bodenkontrolle, die IRIDIUM mit dem öffentlichen Wählnetz verbindet, plante.

8.15.3 Systeme im Ku-, Ka-, Q-, V- und W-Band

Insgesamt wurden im Jahr des Neuen Marktes ca. 50 *Internet-in-the-Sky*-Systeme mit mehr als 1 000 Satelliten proklamiert, in *Low Earth Orbit* (LEO), *Medium altitude Earth Orbit* (MEO), *Polar Earth Orbit* (PEO) und *Geostationary Earth Orbits* (GEO), in den Frequenzlagen Ku-Band (11/14 GHz), Ka-Band (20/30 GHz) und Q-Band (37,5-42,5 und 42,5-43,5 GHz), V-Band (47,2-50,2 und 50,4-51,4 GHz) und W-Band (56 bis 100 GHz):

Internet-in-the-Sky – just above the Clouds

1 SkyStation bei 47,9–48,2 GHz Uplink/47,2–47,5 GHz, geostationär in 20 km Flughöhe

Geostationäre Systeme

- 2 ASTRA-Ka von SES mit 11 GEOs im Ka-Band
- 3 EchoStar von EchoStar Corp. mit 2 GEOs im Ka-Band (wird z.Zt. nicht verfolgt)
- 4 EuSkyWay von ALENIA mit 5 GEOs im Ka-Band
- 5 Orion von LORAL mit 8 GEOs im Ka-Band (wird z.Zt. nicht weiterverfolgt)
- 6 VoiceSpan von AT&T mit 16 GEOs im Ka-Band (wird z.Zt. nicht weiterverfolgt)
- 7 iSky von Ka-Star Corp. mit 2 GEOs im Ka-Band (wird z.Zt. nicht weiterverfolgt)
- 8 MorningStar von MorningStar Corp. mit 4 GEO im Ka/Ku-Band
- 9 Net-Sat von NetSat Corp. mit 1 GEO im Ka-Band
- 10 NET 36 von PanAmSat (Hughes), 9 GEOs, Ka-Band (wird z.Zt. nicht verfolgt)
- 11 ASTROLINK von Lockheed Martin Tlcm. LMT mit 5 bis 9 GEO im Ka-Band
- 12 GE Star von GE Americom mit 9 GEOs im Ka-Band
- 13 SpaceWay von Hughes Communications mit 6 GEOs im Ka-Band
- 14 ASTER von Spectrum Astro Inc. mit 25 GEOs im Ka-Band
- 15 Eutelsat Ka-Band
- 16 WildBlue, Denver, USA; Ka-Band
- 17 StarBand von MicroSoft und EchoStar

Hybride „Internet-in-the-Sky“-Systeme

- 18 SkyBridge von ALCATEL mit 64 LEOs und bis zu 9 GEOs, im Ku-Band

Diese Systeme arbeiten im Ku-, Ka-, Q- und V-Band; die verfügbare Kapazität in den Frequenzbändern ist proportional zur Frequenzlage. Die Anzahl der Systeme ist nicht proportional zum weltweiten Bedarf. Von diesen Programmen sind die Systeme 2, 13, 15 und 16 im Aufbau.

Die SkyStation

Die US-amerikanische SkyStation sieht 250 Zeppeline vor, die über den Weltmetropolen stehen und lokale Breitbanddienste über Kleinsterdfunkstellen abwickeln. Die Idee ist fernmeldetechnisch fundiert – 80% des Verkehrs ist lokal, und den kann der Zeppelin handhaben. Das Problem, den Zeppelin in den Jetstreams mit 200 km/h in 20 000 m Höhe so zu stabilisieren, dass die Antennen am Boden nicht nachgeführt werden müssen – insbesondere bei Nacht, ohne die Energie der Sonne – ist noch nicht gelöst.

8.15.4 Das Ka-Band-System von ASTRA

Der interaktive Rückkanal der Fa. SES unterstützt die (Ku-Band) Fernsehverteilung mit (Ka-Band) Links zwischen Teilnehmer und *Service Center*, über die der Teilnehmer u.a. multimediale Dienste anfordert. Der ASTRA-Ka ging 1999 in Dienst. Weltweit werden ca. 20 geostationäre Orbitalpositionen von SES koordiniert; wahrscheinlich wird die Hälfte dieser Systeme verwirklicht, so dass die INTERNET-Nutzer, die ASTRA-Kunden, die Industrie-, Handels- und Dienstleistungssektoren, Schulen und Behörden mit hinreichender Kapazität versorgt werden können.

8.15.5 Warum Ka-Band? Wie Ka-Band?

Neue Systeme wie der Rückkanal von ASTRA sind meist gezwungen, in höhere Frequenzbänder zu gehen, weil die niedrigen Bänder belegt sind. Sie müssen dabei Nachteile in Kauf nehmen (siehe Tabelle), bekommen aber auch Vorteile:

Gründe für das Ka-Band	Vorteile des Ka-Bandes	Nachteile des Ka-Bandes
niedrige Bänder sind voll belegt	grössere Bandbreiten verfügbar die Antennen sind kleiner (?)	(anfangs) höhere Gerätekosten höhere Regendämpfung

Die Gerätekosten in den höheren Frequenzbändern werden mit den Stückzahlen auf das Niveau des Ku-Bandes fallen und gegen die höhere Regendämpfung können Massnahmen ergriffen werden.

Adaptive Power Control

Für das *Uplink* kann Zusatzleistung im *Satellite Interactive Terminal* (SIT) am Boden vorgehalten werden. Wenn das *Downlink* eine grössere Region bedeckt, wird nur ein Bruchteil dieser Region gleichzeitig stark geregnet; sieht man für jede Übertragung eine gewisse Regenreserve vor, kann man die Satellitensendeleistungsreserven der nicht beregneten Übertragungen auf die kleine Zahl der stark beregneten konzentrieren.

Adaptive Load Control

Wenn sich ein *Spotbeam* auf eine relativ kleine Fläche konzentriert, die voll geregnet wird, dann muss man das Verkehrsvolumen in diesem Spot der Ausbreitung anpassen. Lastabbau auf die Hälfte erlaubt die Erhöhung der Leistung der verbleibenden Übertragung um 3 dB; Abbau auf ein Viertel erlaubt die Erhöhung um 6 dB etc.

Diversity Reception

In Einzelfällen kann auch diversitär empfangen werden. Der Verkehr wird von einer nicht beregneten Station bedient und über alternative Wege zur Beregneten geleitet. Etwa 10 km Separierung reichen schon aus, um dem intensiven Niederschlag zu entkommen.

8.16 Mega LEOs, GEOs, HEOs und HAPs

„Mega“ Satelliten übermitteln Megabit-pro-Sekunde. Mindestens drei Systeme proklamieren Mega LEO Dienste, und je eines als GEO, als HEO und als HAP.

Tabelle 8.9 Geplante Mega LEO und GEO Systeme

System	Teledesic	Celestri	SkyBridge	Euroskyway	PenTriad	SpaceWay
Betreiber	µSoft Corp.	Motorola	Alcatel	ALENIA	BART Corp.	Hughes
Satelliten	288 LEO	63 LEO	64 LEO	3 GEO	9 HEO	2 GEOs
Bahnhöhe	1 400 km	1 400 km	1 400 km	GEO	HEO	GEO
Frequenz	20/30 GHz	20/30 GHz	11/14 GHz	20/30 GHz	40–72 GHz	20/30 GHz
ISL	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Nutzlast	OBP	OBP	„Bent Pipe“	OBP	„Bent Pipe“	OBP
Syst. Kosten	$9 \cdot 10^9$ €	$15 \cdot 10^9$ €	$3,5 \cdot 10^9$ €	$> 1 \cdot 10^9$ €	$> 1 \cdot 10^9$ €	$\approx 1 \cdot 10^9$ €

8.16.1 TELEDESIC

Das US-TELEDESIC war geplant als ein Ka-Band *Mega LEO* für die aktive multimediale Telematik mit bis zu 1,5 Gbit/s (für *Personal Computer Communications; Software and Data Download*) und Geschäftskommunikation einschl. Video, aber auch Sprach- und Datendienste auf der Basis von 64 kbit/s Paketvermittlung. Das uplink ist 28,6–29,1 GHz, das Downlink 18,8–19,3 GHz (je 500 MHz). Die Satelliten speichern die empfangenen Pakete und, wenn der Adressat nicht in der gleichen Region ist, leiten sie über Intersatellitenstrecken im 22 GHz Bereich weiter (*store and forward*). Wie IRIDIUM benötigt TELEDESIC keine terrestrische Infrastruktur.

Das System sieht 12 polare Kreisbahnen (mit 98° Inklinatation) mit je 24 Satelliten vor (15° Abstand zwischen den Satelliten); es fliegen 288 Satelliten mehrmals täglich in 1 400 km Flughöhe über die Pole (wenn der Schwarm korrekt fliegt, überfliegt alle 30 Sekunden ein Satellit, mit GPS navigierend, den Nord- bzw. Südpol). Es bedarf einer exakten Kenntnis der Bahn jedes dieser (mit Reservesatelliten) über 300 Flugeinheiten, um Kollisionen zu vermeiden.

TELEDESIC wollte ab 2000 ca. 20 Mio Teilnehmer bedienen, international und insb. in Regionen mangelnder Infrastruktur. Die Regendämpfung im Ka-Band führt in USA zu 300 min Dienstunterbrechung pro Monat (Dienstverfügbarkeit 99,3%). Das Nutzerterminal ist typischerweise ortsfest – etwa 0,5 m Durchmesser. Neben der Rechnernetzwerk und Videokonferenzen sah man einen Markt in den weniger entwickelten Ländern. Die Kosten für terrestrische Infrastrukturen steigen überproportional mit sinkender Bevölkerungsdichte, so dass es für einen grossen Teil der Welt unerschwinglich bleiben wird, am *Information Age* teilzunehmen. Hier wollte TELEDESIC Dienste auch für Regierungsstellen Kommunikation für die öffentliche Verwaltung, Schulwesen, die Gesundheitsministerien und deren Einrichtungen beistellen; Teilhaber an dem 9 Mrd. Euro Vorhaben:

- Graig McCaw, der grösste (terrestrische) Mobilfunkbetreiber der USA; jüngst von der (in der ortsfesten Kommunikation grossen) AT&T aufgekauft und ausbezahlt;
- Microsoft Corp., Redmond (William „Bill“ Gates), der weltgrösste Software-Konzern (MS-DOS, Windows, Betriebssysteme; seit 1993 mehr als 1 Mrd. Euro/a Gewinn);

- Boeing Aircraft Co., die 1997 McDonnell-Douglas (*DELTA-Launcher*), Rockwell International (Hersteller der GPS-Satelliten) und Hughes aufgekauft hat.

TELEDESIC hat das Projekt eingestellt und seine Lizenz im Juli 2003 an die US-FCC zurückgegeben.

8.16.2 Celestri

Das US-amerikanische Celestri der Fa. Motorola war lediglich eine Antwort auf Teledesic; es sollte im gleichen Geschäftsfeld mit einer ähnlichen Konstellation im gleichen Frequenzbereich Paroli bieten. Es wurde dann aber nicht finanziert und ebenfalls zurückgezogen.

8.16.3 SkyBridge

Das SkyBridge-Satellite Telematics, Internetting and Video on Demand (SATIVoD) ist ein Satellitensystem für multimediale Dienste: 64 Satelliten in 1 450 km Höhe in 8 Bahnebenen, 55° inkliniert, à 8 Satelliten. Das Frequenzband ist Ku (11/14 GHz; im Gegensatz zu TELEDESICs Ka-Band). Das System handhabt bis zu 80 Gbit/s; der Nutzer bekommt bis zu 60 Mbit/s. *Gateways* leiten den Verkehr in das terrestrische Netz; die Satelliten sind nicht verbunden (keine ISL).

SkyBridge verspricht eine Diensteverfügbarkeit von 99,7% (120 min/Monat wetterbedingte Unterbrechung). In Gebieten hohen Verkehrsaufkommens (Europa, USA etc.) wird die Konstellation von einzelnen geostationären Satelliten unterstützt(!). Skybridge wurde funkverwaltungstechnisch bei der FCC (USA) angemeldet.

Das verwendete Ku-Band ist in Konkurrenz mit unzähligen GEOs, die schon seit langem in diesem Band arbeiten, also Vorrecht haben. SkyBridge verspricht, die Störung dieser Systeme dadurch zu vermeiden, dass sie die Abstrahlung dann unterbrechen, wenn die Verlängerung der Funkstrecke auf einen GEO treffen und ihn stören würde. Da ein SkyBridge- μ SAT im Mittel vier Satelliten sieht, kann der Verkehr auf eine andere Flugeinheit umgeleitet und so die Verbindung aufrechterhalten werden. Skybridge wollte den Verkehr 2001 aufnehmen; bei Redaktionsschluss hat man noch nichts davon gehört. Skybridge hat seine Lizenz nicht an die US-FCC zurückgegeben.

8.16.4 EuroSkyWay

Das EuroSkyWay der Fa. Alenia wurde lange von der ESA gefördert, obwohl eine professionelle Markteinführung nicht erkennbar war. Immerhin wäre es geostationär geflogen und hatte im 20/30 GHz Bereich technologisch sinnvolle Ansätze, bevor es dann auch ad acta gelegt wurde, wie es scheint.

8.16.5 QUASISTATIONARY/PENTRIAD

Das geplante US-System PENTRIAD soll auf LOOPUS-Bahnen (s. Kap. 2.5) fliegen (14,4h-Periode). Mit neun Satelliten werden fünf (PENT) Schleifen geflogen, zur Abdeckung der drei (TRIAD) industrialisierten Regionen dieser Welt: Nordamerika, Europa und Nordostasien (China/Japan/Korea/Singapur). Mit nur neun aktiven Satelliten wird etwa 90% des Weltwirtschaftsraumes bedient.

PENTRIAD ist bei der FCC (USA) angemeldet mit den Betriebsfrequenzen

Ku-Band: 10,7-12,7 GHz und 14,0 - 14,5 GHz (Space-to-Earth),

Q-Band: 37,5 - 38,5 GHz und 40,5 - 42,5 GHz (Space-to-Earth)

V-Band: 47,2 - 50,2 GHz (Earth-to-Space)

W-Band: 66,0 - 67,0 GHz (Space-to-HAPS¹⁸), 71,0 - 72,0 GHz (HAPS-to-Space).

Damit wird Geschäftskommunikation unterstützt, die Verbindung von Konzern-LANs und -WANs, oder auch die Verbindung von Glasfaserkopfstationen mit den Kunden im Stadtzentrum. Ausserdem werden Fernsehverteilung, Breitband-Internetting und multimediale Dienste angeboten. Die Nutzer verwenden kleine aber gerichtete Antennen der Grösse einer Pizza.

Die beträchtliche Dämpfung des Höchstfrequenzsignals in der Atmosphäre wird durch die grosse Elevation zum LOOPUS begrenzt, die in der aktiven Schleife $\geq 70^\circ$ ist. Die Weglänge L durch die Atmosphäre als Funktion der Elevation ε ist

$$L = -R \cdot \sin(\varepsilon) + \sqrt{R^2 \cdot \sin^2(\varepsilon) + 2 \cdot R \cdot H + H^2} \quad (8.1)$$

mit $R = 6378$ km (Erdradius) und $H = 5$ km der effektiven Höhe der Atmosphäre.

Damit ergeben sich folgende Weglängen und Regendämpfungen:

Elevation ε	90°	70°	20°
Gesamtweglänge	35 787 km	36 115 km	39 555 km
Weglänge L	5000 m	5300 m	15 000 m
Regendämpfung bei 11/14 GHz	10,0 dB	10,6 dB	30,0 dB
„ bei 20/30 GHz	25,0 dB	25,6 dB	75,0 dB

Die Weglänge bei 20° Elevation ist fast dreimal so lang wie die für $\varepsilon = 70^\circ$. Wenn die Regendämpfung bei 70° z.B. 10 dB beträgt, würde sie bei 20° Elevation zu 30 dB. Die 10 dB kann man durch geeignete Protokolle noch auffangen, nicht aber 30 dB Zusatzdämpfung, die man z.B. in Nordeuropa zum GEO hätte.

Durch die Verwendung der LOOPUS-Bahn wird im PENTRIAD-System der Einsatz höchster Frequenzen (in den Q-, V- und W-Bändern) ermöglicht.

8.16.6 SpaceWay

Die kommerzielle Weiterführung der ACTS-Technologie (s. Kap. 8.14.2, Das ACTS der NASA) wurde von *Hughes Communications Galaxy Inc.* mit dem System *SPACEWAY* angemeldet. Es beinhaltet eine Flotte geostationärer Satelliten mit 48 *Spot-*

¹⁸HAPS = *High Altitude Platforms*; Vehikel, die als Relais in der Stratosphäre fliegen

beams über den USA (im Ka-Band; 20/30 GHz) für den Betrieb mit sehr kosteneffektiven VSATs für die Übertragung von Sprache, Bildtelefon, IP und Video zu privaten Teilnehmern wie auch zu Geschäftsanschlüssen.

Am Boden werden mit VSAT von 66 cm Durchmesser bis zu 384 kbit/s gesendet und empfangen, für Bildtelefon und *Medium Data Rate* (MDR). Im Raum wird eine Weiterentwicklung des ACTS-OBP verwendet. Jeder Satellit bedient eine Bandbreite von 5,7 GHz – weit mehr als in passiven Satelliten dieser Grösse.

Noch in 2006 ging SpaceWay von Hughes in Dienst: Drei GEOs, zunächst auf 102.8°W und 99.2°W über Nordamerika, im Ka-Band, mit bordseitiger Signalverarbeitung und (insb.) Vermittlung von 512 kb/s bis 16 Mb/s zwischen den 48 Zellen, die der Satellit auf Nordamerika projiziert, in Mesh-Topologie mit „*hopping spot beams*“, für Sprache, Internet, Daten, Video und Multimediaanwendungen einschliesslich Multicast und Broadcast. Das System hat die zehnfache Kapazität von herkömmlichen, geostationären Systemen (10 Gb/s) und etwa die hundertfache von LEO-Systemen – zu einem Zehntel der Kosten von LEO-Systemen.

8.16.7 Netzkontrolle und Überleitfunktion

Die Netzkontrolle verwaltet die Ressourcen des Netzwerks, stellt sicher, dass die Nutzer die gewünschten Dienste mit der gesetzten Priorität und der vereinbarten Qualität erhalten, kontrolliert den Verkehr im Netz und sorgt für die Umsetzung des Teilverkehrs, der in ein anderes Netz abgehen soll. Über die reine Vermittlungsfunktion hinaus organisiert die Netzkontrolle auch die Bündelung von Verkehr gleichen Zieles (Multiplexing), einschliesslich solchen Verkehrs, der zu einem gemeinsamen Ziel in einem anderen Netz geroutet wird.

8.16.8 Protokolle

Das Protokoll, im alten Griechenland ein den amtlichen Papyrusrollen vorgeleimtes Blatt, ist ein im Voraus und nach bestimmten Regeln definierter Ablauf, Vorgang oder Prozess bzw. die Aufzeichnung eines solchen Prozesses. In Kommunikations- und Rechnernetzen sind nach bestimmten Regeln definierte Abläufe und Prozesse bei Aufbau, Aufrechterhaltung und Abbau von Verbindungen unerlässlich. Diese werden in Kap. 6.6 beschrieben.

8.16.9 Überleitfunktion/der Gateway

Der Gateway ist die Übergabestelle zwischen zwei, auch dissimilaren, Netzen. Er setzt unterschiedliche Standards (analog/digital etc.), Bitraten (2,4 kb/s im Mobilfunk/64 kb/s ISDN etc.) und Kommunikationsprotokolle (bis zur Schicht 7) um.

8.16.10 Zusammenfassung Mega Systeme

Die Breitbandsysteme weisen die Richtung in die Zukunft der funkgestützten Telekommunikation. Die Beispiele SkyBridge/Pentriad und Celestri/TELEDESIC demonstrieren auch das Ausmass an Sättigung des nutzbaren Frequenzbandes, das

wir schon heute erreicht haben. Die Erschliessung immer höherer Frequenzbereiche ist ebenso notwendig wie die Umlegung all jenes Verkehrs, der nicht von der Funkstützung abhängt, auf die Glasfaser.

8.17 Zusammenfassung

Kommerzielle Satelliten-Datenverteilendienste wurden in den USA flächendeckend eingeführt und auch in Europa stehen heute unzählige Netze. Im hochtechnisierten Europa wird der Anschluss an die internationale Konkurrenz in Effizienz und Flexibilität, u.a. im Innovationsbereich, angestrebt. Die Kosten der Satellitenübertragung folgen dem Trend in der Elektronik: Sie werden von Jahr zu Jahr geringer. Dennoch sollten VSAT und insb. *Hub*, wenn immer möglich, geteilt werden. Es ist abzusehen, dass ein gemeinsamer Industriestandard für die Übertragung, den Zugriff und die Protokolle eingeführt wird.

VSAT begannen vor ca. zehn Jahren; bis vor kurzem hiess es, dass sie spätestens in der nächsten Dekade von den terrestrischen Netzen wieder verdrängt werden würden. Heute ist ersichtlich, dass die Satellitenlösung eine grössere Zukunft hat als je angenommen wurde, im professionellen wie im persönlichen Bereich.

Die neue Generation von Satellitensystemen, angeführt von ACTS und umgesetzt in SpaceWay etc., wird noch grössere Bitraten anbieten, nicht jedoch noch kleinere Terminals. Diese Bitraten werden nur bei höheren Frequenzen möglich, in denen die Signale aber in der Atmosphäre – insb. bei Regen – extrem gedämpft werden. Die Frequenzen reichen schon heute bis 67/72 GHz-Bereich. Es werden neue Protokolle und Verfügbarkeitsdefinitionen benötigt, für Unterbrechungen von fünf bis zehn Std. pro Monat.

Asynchrone *Store-and-Forward* Übermittlung scheint der *Transfer Modus* der Zukunft, mit ATM (das auch über Satelliten läuft) dem zentralen Verfahren.

EuroSkyWay zielt eher auf den kommerziellen Nutzer, während Teledesic auch den privaten PC-Besitzer und Internet-User anspricht. Beide Arten von Anwendern verlangen in der nahen Zukunft Mbit/s und Gbit/s vom Netz zum Anwender; in der umgekehrten Richtung werden einige kb/s ausreichen, da der Nutzer in der Regel nicht mehr generiert.

Die Blase der Mega-LEO Systeme ist geplatzt, Teledesic ist abgesagt, die GEOs übertragen die Gigabits pro Sekunde ins Haus oder ins Büro. Auch die *Personal Communications* (PCS) sind zum GEO zurück gekommen.

Ebenso wird Fernsehen und digitaler Hörrundfunk (*Digital Audio Broadcast*; DAB) vom GEO aus verteilt, in Europa, dem amerikanischen Kontinent, in Asien und Afrika. DAB war mit mehreren Systemen schon seit mehr als zehn Jahren im GEO; die neuen Systeme bringen aber den Handy-Empfänger.

Für Breitbanddienste mit Megabitraten wurden 1997 etwa 130 neue Ka-Satelliten im GEO proklamiert, fast alle unter US-Kontrolle und über die ganze Welt verteilt. Europa war in dieser entscheidenden Phase der Globalisierung – die so relevant für die Zukunft Europas ist – nicht Motor der Entwicklung. Erfahrungsgemäss werden aber nicht alle Systeme, die die USA proklamieren, dann auch realisiert. Auch

Ballone wurden von den USA vorgeschlagen, um weltweiten Web-Zugang und Breitbanddienste (bei 47 GHz) zu ermöglichen. Wenn immer der Verkehr terrestrisch über einige Knotenrechner führt (und dabei einige 100 ms Laufzeit erfährt), wird die stratosphärische Plattform vergleichsweise attraktiv.

Geostationäre Satelliten werden also noch lange das Arbeitspferd der Satellitenkommunikation bleiben. Sie konzentrieren sich auf das Zielgebiet, während die LEO 70% der Zeit über Wasser und 80% der Restzeit über Wüste oder unbewohntem Land fliegen, ihre Kapazität also 94% der Zeit ungenutzt bleibt.

Die US-Anmeldungen von Breitbandsystemen einschliesslich LEO beinhalten über 1 000 Satelliten, die ca. 34 Mrd. Euro kosten; der weltweite kommerzielle Umsatz in der Raumfahrt übersteigt 60 Mrd. Euro p.a. und wächst etwa 20% jährlich.

Daneben arbeiten auch Ortungssysteme im GEO: Sämtliche satellitengestützte Funkortungssysteme, die heute Rendite erwirtschaften, sind im GEO (OmniTracs, EutelTracs, StarFix, FUGRO etc.). Auch zukünftige NAVSAT-Systeme werden GEOs beinhalten (EGNOS, WAAS, MSAS, GAGAN, BEIDU etc.), unterstützt z.B. von IGSOs; beide können regional aufgebaut werden.

Weltweit verdoppelt sich die *Satellite Performance* alle zwei Jahre – ein Effekt ähnlich *Moore's Law*, der 1975 prophezeite, dass sich die Anzahl der Transistoren in integrierten Schaltkreisen alle 1,5 Jahre verdoppeln würde – was bis heute zutreffend ist, wie auch die für „moderne“ Software notwendige Speicherkapazität sich alle 1,5 Jahre verdoppelt.

Literaturhinweise

Satellite Broadband, monatliche Fachzeitschrift; 5 680 Greenwood Plaza Blvd., Greenwood Village, Con., USA, 2001

Hans Peter Dittler, „Das neue Internet-Protokoll“, dpunkt.verlag, 2001

J. Everett, „VSATs“, IEE Telecommunications Series 28, 1992

Czichos, H., Hennecke, M., „Das Ingenieur-Wissen“, Springer, 2004

Jähne, B., „Digilae Bildverarbeitung“, Springer, 2005